

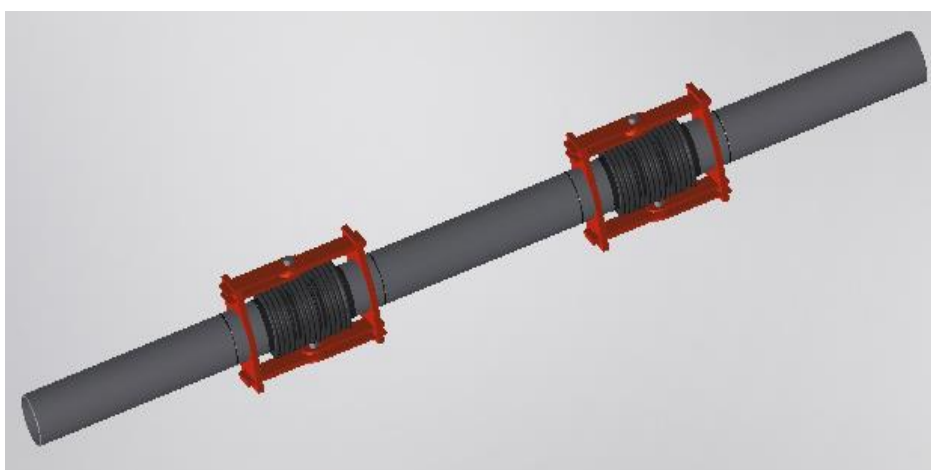


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

# ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**Γεώργιος Κορακίτης**

ΕΜΚ ΔΕ 2015 35

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Μελισσιανός, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



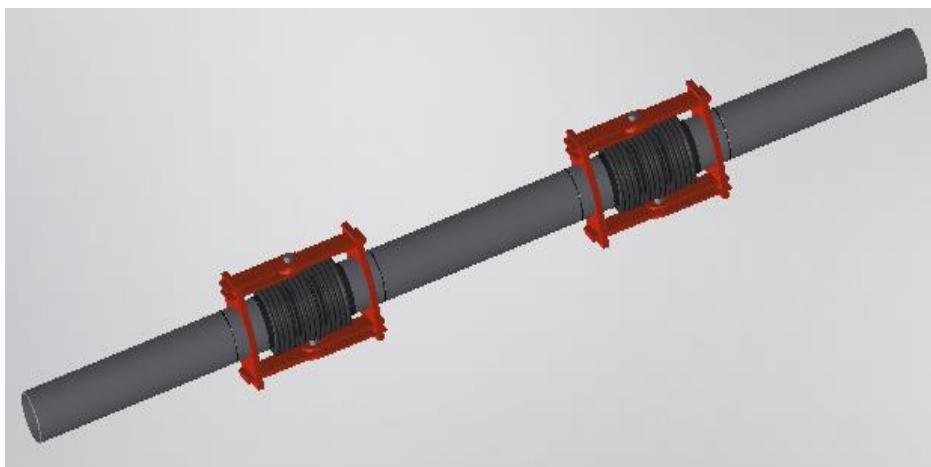


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

# ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**Γεώργιος Κορακίτης**

ΕΜΚ ΔΕ 2015 35

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Μελισσιανός, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



Γεώργιος Π. Κορακίτης (2015)

Προστασία υπόγειου μεταλλικού αγωγού έναντι τεκτονικής διάρρηξης οριζόντιας ολίσθησης με χρήση  
εύκαμπτων κόμβων

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015 35

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

George P. Korakitis (2015)

Protection of buried steel pipeline against strike-slip faulting using flexible joints

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015 35

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Copyright © Γεώργιος Π. Κορακίτης, 2015  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © George P. Korakitis, 2015  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτή την προσπάθεια καθοριστική υπήρξε η συμβολή, η καθοδήγηση και η στήριξη ορισμένων ανθρώπων που βρέθηκαν δίπλα μου.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χάρη Γαντέ, καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., που μου έδωσε τη δυνατότητα να διεκπεραιώσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή του δείχνοντας εμπιστοσύνη στο πρόσωπό μου. Η συστηματική καθοδήγηση και οι ποιοτικές παρατηρήσεις του διαδραμάτισαν σπουδαίο ρόλο στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Βασίλη Μελισσιανό, υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε καθόλη τη διάρκεια της εργασίας. Η υποδειγματική αφοσίωση στη διδακτορική του διατριβή σε συνδυασμό με τις άμεσες διορθώσεις και τις πολύτιμες συμβουλές του συνέβαλαν σε καθοριστικό βαθμό στη διαμόρφωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Βάγια, Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., και τον κ. Εμμανουήλ Βουγιούκα, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Για τη βοήθειά της στη μορφοποίηση του κειμένου θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό του Ε.Μ.Π.

Για το ευχάριστο κλίμα όσο καιρό δουλέψαμε στον ίδιο χώρο και τις χρήσιμες συμβουλές τους ευχαριστώ τον Ηλία Θανάσουλα και το Στέλιο Βερνάρδο, υποψήφιους Διδάκτορες του Ε.Μ.Π.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να σταθώ και στα πρόσωπα που με στηρίζουν καθόλη τη διάρκεια των σχολικών και φοιτητικών μου χρόνων. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Παναγιώτη και Έρση, την αδερφή μου, Άννα-Μαρία, και τους συμφοιτητές και φίλους μου για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους.

*Γιώργος Κορακίτης*

*Οκτώβριος 2015*







ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2015 35

## **ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ**

**Γιώργος Κορακίτης**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Συνεπιβλέπων: Βασίλειος Μελισσιανός, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη χρήση εύκαμπτων κόμβων σε υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς που διασταυρώνονται με ενεργά σεισμικά ρήγματα. Η διάρρηξη σεισμικού ρήγματος επιβάλλει μεγάλες εδαφικές παραμορφώσεις στο χαλύβδινο αγωγό, ο οποίος τις παραλαμβάνει αναπτύσσοντας μεγάλη ένταση σε όρους ανηγμένων παραμορφώσεων. Η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων αποτελεί μια νέα προτεινόμενη μέθοδο για την πρόληψη ενδεχόμενων αστοχιών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο υπό μελέτη πρόβλημα της διέλευσης αγωγών καυσίμων από σεισμικά ρήγματα και τονίζεται η σημασία διαφύλαξης της ακεραιότητάς τους έναντι σεισμικών και μη κινδύνων, ενώ παρατίθενται τα συνήθη μέτρα προστασίας που εφαρμόζονται. Ακολούθως περιγράφεται το νέο προτεινόμενο μέτρο προστασίας των αγωγών, το οποίο είναι η εισαγωγή εύκαμπτων κόμβων μεταξύ των διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων του αγωγού. Περιγράφεται αναλυτικά ο κατάλληλος τύπος των εύκαμπτων κόμβων για χρήση σε υπόγειους αγωγούς, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνονται αριθμητικά η αλληλεπίδραση αγωγού – εδάφους και η σεισμική διάρρηξη.

Στο δεύτερο και στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού. Η βασική παράμετρος επιρροής της απόκρισης του αγωγού είναι η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος ( $\beta$ ). Στο δεύτερο κεφάλαιο διερευνάται η περίπτωση  $\beta \leq 90^\circ$  (επιβολή κάμψης και εφελκυσμού) ενώ στο τρίτο η περίπτωση  $\beta > 90^\circ$  (επιβολή κάμψης και θλίψης). Σε κάθε κεφάλαιο εξετάζεται αρχικά ο συνεχής αγωγός και η επιρροή που ασκούν στην απόκρισή του η μετακίνηση του ρήγματος και η γωνία διασταύρωσης. Ακολούθως, με βάση το διάγραμμα καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού, εξετάζονται διάφοροι συνδυασμοί εύκαμπτων κόμβων ως προς το πλήθος και τη θέση τους και συγκρίνονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους στην απομείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της διαμέτρου, του πάχους τοιχώματος και του βάθους ταφής του μεταλλικού αγωγού στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του αγωγού καθορίζονται συνήθως από μη-σεισμικές παραμέτρους λειτουργικότητας, ωστόσο ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος τοιχώματος καθορίζει τη λυγρηρότητά του και κατά συνέπεια διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην τοπική και καθολική ευστάθεια του

αγωγού. Επιπλέον, το βάθος ταφής καθορίζει την αναπτυσσόμενη τριβή στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους και έτσι αποτελεί σημαντική παράμετρο για τη μηχανική συμπεριφορά του αγωγού όταν υπόκειται σε μεγάλες μετακινήσεις λόγω της ενεργοποίησης ρήγματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων συναρτήσει της αβεβαιότητας ως προς τη θέση εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης. Τα διαθέσιμα σεισμολογικά και γεωτεχνικά δεδομένα και η επεξεργασία τους πολλές φορές δεν επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του ρήγματος. Η διάδοση της σεισμικής διάρρηξης μέχρι την επιφάνεια του εδάφους δεν είναι πάντα προβλέψιμη, για αυτό και είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα κατά το σχεδιασμό και τη μελέτη ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού. Για το λόγο αυτό εξετάζεται η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων ως προς τη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων σε περιπτώσεις όπου το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται σε διαφορετική θέση από την αναμενόμενη. Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των εύκαμπτων κόμβων.

Η διπλωματική αυτή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)» της Δράσης «Αριστεία II» (ΕΣΠΑ 2007-2013).



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2015 35

## **PROTECTION OF BURIED STEEL PIPELINE AGAINST STRIKE-SLIP FAULTING USING FLEXIBLE JOINTS**

**George Korakitis**

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.  
Co-supervisor: Vasileios Melissianos, PhD Student N.T.U.A.

### **ABSTRACT**

The present diploma thesis deals with the use of flexible joints in buried pipelines crossing active seismic faults. The activation of the seismic fault imposes large ground displacements and as a result the pipeline develops high strains. The use of flexible joints constitutes an innovative mitigating measure against the consequences of faulting on pipelines.

In the first chapter, an introduction in pipelines and pipeline – fault crossing is presented. The significance of protecting pipelines' integrity against seismic and non-seismic hazards is highlighted. At the same time, the most common mitigating methods are briefly mentioned, while the appropriate type of flexible joints for buried pipelines and their characteristics are described. The numerical modeling of the pipeline – soil interaction is also introduced.

In the second and the third chapter, the results of an extensive parametric investigation based on nonlinear analyses are presented. Pipeline – fault crossing angle ( $\beta$ ) is a dominant parameter of the pipeline mechanical behavior due to strike-slip faulting. In the second chapter the crossing angle is considered  $\beta \leq 90^\circ$  (pipeline develops tension and bending), while in the third chapter the angle is assumed  $\beta > 90^\circ$  (pipeline under compression and bending). In each chapter the continuous pipeline is examined at first and the impact of fault offset magnitude and pipeline – fault crossing angle on its response is investigated. The introduction of flexible joints is based on the bending moment distribution of the continuous pipeline. Alternative cases regarding the number and the location of flexible joints are examined and their efficiency towards strain reduction is evaluated.

In the fourth chapter, the influence of the diameter, the wall thickness and the burial depth on the effectiveness of flexible joints is investigated. The geometrical characteristics of the pipeline cross-section are typically defined by non-seismic parameters. However, the diameter over thickness ratio plays a dominant role in the pipeline response and especially on buckling behavior, as it defines the pipe slenderness. Moreover, soil response to any pipeline movement in the trench is directly associated to the burial depth, as the amount of overburden soil determines the imposed soil pressure on the pipeline. It is therefore meaningful to investigate the effect of burial depth on the strain reduction efficiency of flexible joints.

In the fifth chapter, the effectiveness of flexible joints is estimated regarding the uncertainty on fault trace. The available seismological and geotechnical data and the existing methods to analyze them do not always allow the accurate determination of the fault trace. Rupture propagation to the ground surface is not always predictable and uncertainty on fault trace must be taken into consideration in the pipeline – fault crossing analysis. For that reason, the efficiency of flexible joints in reducing tensile and compressive strains, in case the fault trace appears on a different location from the one expected, is evaluated. In the sixth and final chapter, conclusions of the diploma thesis are presented and proposals for the further investigation of flexible joints' efficiency are suggested.

The present diploma thesis is part of the research program "Novel design concepts for Energy related Steel STRuctures using Advanced Materials – ENSSTRAM" of the project "Aristeia II" (NSRF 2007-2013).

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>1</b>
1.1	ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΑΓΩΓΟΙ	1
1.2	ΣΥΝΗΘΗ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ	3
1.2.1	Επίχωση με κοκκώδη υλικά	3
1.2.2	Αύξηση του πλάτους του ορύγματος	4
1.2.3	Περιέλιξη αγωγού με γεώφασμα	4
1.2.4	Χρήση ορθογωνικών οχετών (culverts)	5
1.3	ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ	6
1.4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	8
1.4.1	Προσομοίωση αγωγού	8
1.4.2	Προσομοίωση εδάφους	11
1.4.3	Προσομοίωση ρήγματος	13
<b>2</b>	<b>ΑΓΩΓΟΣ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ</b>	<b>17</b>
2.1	ΓΕΝΙΚΑ	17
2.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ ..	17
2.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ – ΡΗΓΜΑΤΟΣ	24
2.4	ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ	29
2.4.1	Κριτήρια χωροθέτησης εύκαμπτων κόμβων	29
2.4.2	Αποτελέσματα διερεύνησης	31
2.4.2.1	Γωνία διασταύρωσης $\beta=90^\circ$	31
2.4.2.2	Γωνία διασταύρωσης $\beta=70^\circ$	38
2.4.2.3	Γωνία διασταύρωσης $\beta=50^\circ$	45
2.4.3	Αποδοτικότητα εύκαμπτων κόμβων	52
2.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	53

<b>3</b>	<b>ΑΓΩΓΟΣ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗ.....</b>	<b>57</b>
3.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	57
3.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ... 58	58
3.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ – ΡΗΓΜΑΤΟΣ .....	64
3.4	ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ.....	68
3.4.1	Κριτήρια χωροθέτησης εύκαμπτων κόμβων .....	68
3.4.2	Αποτελέσματα διερεύνησης.....	69
3.4.2.1	Γωνία διασταύρωσης $\beta=100^\circ$ .....	69
3.4.2.2	Γωνία διασταύρωσης $\beta=110^\circ$ .....	73
3.4.2.3	Γωνία διασταύρωσης $\beta=120^\circ$ .....	78
3.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
<b>4</b>	<b>ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ.....</b>	<b>85</b>
4.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	85
4.2	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ .....	85
4.2.1	Μεταβολή του λόγου $D/t$ .....	85
4.2.2	Σταθερό γινόμενο $D \times t$ .....	89
4.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΑΦΗΣ .....	93
4.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	97
<b>5</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>99</b>
5.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	99
5.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ.....	99
5.2.1	Κόμβοι σε αποστάσεις $L/2$ και $L$ .....	99
5.2.1.1	Γωνία διασταύρωσης $\beta=70^\circ$ .....	100
5.2.1.2	Γωνία διασταύρωσης $\beta=90^\circ$ .....	102
5.2.2	Κόμβοι σε αποστάσεις $L$ και $2L$ .....	104
5.2.2.1	Γωνία διασταύρωσης $\beta=70^\circ$ .....	104
5.2.2.2	Γωνία διασταύρωσης $\beta=90^\circ$ .....	106
5.3	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	108
<b>6</b>	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>109</b>
6.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	109
6.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	110
6.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....	112
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>113</b>

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΥΠΟΓΕΙΟΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΙ ΑΓΩΓΟΙ

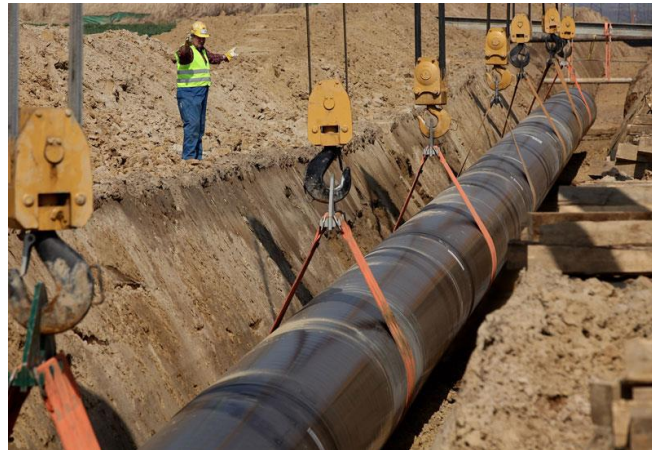
Στην εποχή μας, δεδομένων των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, είναι επιτακτική η ανάγκη για την κατασκευή αγωγών που μεταφέρουν καύσιμα από κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου τα οποία βρίσκονται χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά από τους τελικούς τους προορισμούς. Παραδείγματα τέτοιων αγωγών είναι οι αγωγοί της Βόρειας Αμερικής που εκτείνονται από το Τέξας και τη Λουιζιάνα μέχρι τη βορειοανατολική ακτή και από την Αλμπέρτα ως τον Ατλαντικό Ωκεανό. Η καθημερινότητά στις σύγχρονες κοινωνίες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή, αδιάκοπη και ασφαλή λειτουργία των δικτύων υγρών και αέριων καυσίμων. Η χρήση τους μπορεί να είναι βιομηχανική, όπως σε εργαστήσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ή οικιακή για τη θέρμανση, το ζεστό νερό, το μαγείρεμα και τον κλιματισμό, ενώ επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως στις συγκοινωνίες.

Οι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων κατασκευάζονται από χαλύβδινους σωλήνες, οι οποίοι συνήθως βρίσκονται θαμμένοι σε βάθος μερικών μέτρων ώστε να προστατεύονται έναντι διάβρωσης και διάφορων τυχνηματικών δράσεων, όπως είναι η θραύση από χτύπημα γεωργικού μηχανήματος και η πυρκαγιά. Εκτείνονται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις και μπορούν να διέρχονται τόσο από την ξηρά όσο και από τη θάλασσα, ενώ κατά την κατασκευή τους προκύπτουν συχνά διακρατικά προβλήματα λόγω της ανάγκης διέλευσής τους μέσω διαφορετικών χωρών. Η διαδρομή των αγωγών οφείλει να σχεδιάζεται με σεβασμό στις περιβαλλοντικά, κοινωνικά και πολιτιστικά ευαίσθητες περιοχές και με στόχο τη μείωση των επιπτώσεων από την κατασκευή τους.

Η κατασκευή ενός αγωγού μεταφοράς καυσίμων είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο έργο, με μεγάλη οικονομική και περιβαλλοντική σημασία για ολόκληρη την κοινωνία, και απαιτεί σημαντικούς πόρους, τεχνογνωσία κορυφαίου επιπέδου και τήρηση των υψηλότερων προτύπων ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος. Η κατασκευαστική διαδικασία χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα έτσι ώστε η ολοκλήρωση του έργου να πραγματοποιείται στο μικρότερο δυνατό χρονικό διάστημα και να ελαχιστοποιείται η όχληση των περιοχών από τις οποίες διέρχεται ο αγωγός. Είναι απαραίτητος ο αποτελεσματικός συντονισμός των διαφορετικών εργασιών, οι οποίες περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την εκκαφή του ορύγματος, την εργοταξιακή συγκόλληση των επιμέρους τμημάτων του αγωγού (Σχήμα 1-1), την τοποθέτηση του αγωγού εντός του ορύγματος και την επίχωσή του με το επιφανειακό χώμα.



(α)



(β)

Σχήμα 1-1: Συγκόλληση των επιμέρους τμημάτων του αγωγού και τοποθέτησή του στο όρυγμα ([www.tap-ag.gr](http://www.tap-ag.gr))

Στις μέρες μας και στη χώρα μας πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του Αδριατικού Αγωγού Φυσικού Αερίου (Trans Adriatic Pipeline – TAP) που θα μεταφέρει φυσικό αέριο από τα κοιτάσματα του Αζερμπαϊτζάν στην Κασπία Θάλασσα. Ο TAP, ο οποίος θα έχει μήκος 870km (Σχήμα 1-2), θα διασυνδεθεί με τον αγωγό φυσικού αερίου Ανατολίας (TANAP) στα ελληνοτουρκικά σύνορα και θα διέρχεται από τη Βόρεια Ελλάδα, την Αλβανία και την Αδριατική Θάλασσα προτού καταλήξει στις ακτές της Νότιας Ιταλίας. Εκεί θα συνδεθεί με το ιταλικό δίκτυο φυσικού αερίου και θα μπορεί να τροφοδοτεί και τις υπόλοιπες αγορές της Δυτικής Ευρώπης. Οι τρεις χώρες από τις οποίες θα περάσει ο αγωγός – Ελλάδα, Αλβανία και Ιταλία – έχουν δεσμευθεί όσον αφορά τον TAP με την υπογραφή τριμερούς διακρατικής συμφωνίας (IGA) το 2013. Το έργο βρίσκεται επί του παρόντος στη φάση της υλοποίησης και η κατασκευή του αγωγού αναμένεται να ξεκινήσει το 2016.



Σχήμα 1-2: Αδριατικός Αγωγός Φυσικού Αερίου – TAP ([www.tap-ag.gr](http://www.tap-ag.gr))

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αγωγού οφείλει να συμμορφώνεται με τους διεθνείς κανονισμούς και περιορισμούς. Κατά τη χάραξη του αγωγού είναι απαραίτητη η αποφυγή οικιστικών ή περιβαλλοντικά ευαίσθητων περιοχών καθώς μια ενδεχόμενη αστοχία θα είχε ανυπολόγιστες συνέπειες. Η διαρροή, θραύση ή ακόμα και έκρηξη του αγωγού ενδέχεται να προκαλέσει σημαντικές οικονομικές



και περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή του αγωγού, ενώ μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην απώλεια ανθρώπινων ζωών.

Κατά την όδευση του αγωγού είναι επίσης επιθυμητή η αποφυγή σεισμογενών περιοχών που περιλαμβάνουν συνήθως ενεργά τεκτονικά ρήγματα. Η ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος επιβάλλει στον αγωγό μεγάλες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις τις οποίες, όντας θαμμένος στο έδαφος, είναι αναγκασμένος να ακολουθήσει [1] και έτσι τίθεται σε μεγάλο κίνδυνο η ακεραιότητά του. Ωστόσο, κάτι τέτοιο είναι πολλές φορές αναπόφευκτο είτε λόγω της μη ύπαρξης εναλλακτικών διαδρομών είτε λόγω αβεβαιοτήτων ως προς τον τρόπο εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης. Είναι επομένως αναγκαίο να προβλεφθούν κατά το δυνατόν οι επιβαλλόμενες μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις ώστε να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του αγωγού, καθώς και να εφαρμοσθούν μέτρα για τη διαφύλαξη της ακεραιότητάς τους.

## **1.2 ΣΥΝΗΘΗ ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ**

Πολλά μέτρα έχουν προταθεί και μπορούν να εφαρμοσθούν ώστε να προστατευθούν οι υπόγειοι μεταλλικοί αγωγοί που διέρχονται από περιοχές με ενεργά σεισμικά ρήγματα. Η αλλαγή της χάραξης του αγωγού κατά το σχεδιασμό ώστε να αποφεύγονται περιοχές υψηλού κινδύνου είναι ίσως ο αποτελεσματικότερος τρόπος προστασίας. Κάτι τέτοιο ωστόσο είναι αρκετές φορές αδύνατο λόγω του υψηλού κόστους αλλαγής της όδευσης ή της αδυναμίας εύρεσης εναλλακτικής διαδρομής. Επιπλέον, ο τρόπος εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης δεν είναι πάντοτε προβλέψιμος και υπάρχουν πολλές αβεβαιότητες που είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος βελτίωσης της απόκρισης του αγωγού έναντι σεισμικής διάρρηξης είναι η αύξηση του πάχους του τοιχώματός του ή η χρήση χάλυβα υψηλότερης κατηγορίας, αυξάνοντας έτσι τη δυσκαμψία του αγωγού ([2],[3]). Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται διάφοροι άλλοι τρόποι αντιμετώπισης που εφαρμόζονται αποτελεσματικά στην πράξη, οι περισσότεροι εκ των οποίων αποσκοπούν στην απομείωση της τριβής που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους.

### **1.2.1 Επίχωση με κοκκώδη υλικά**

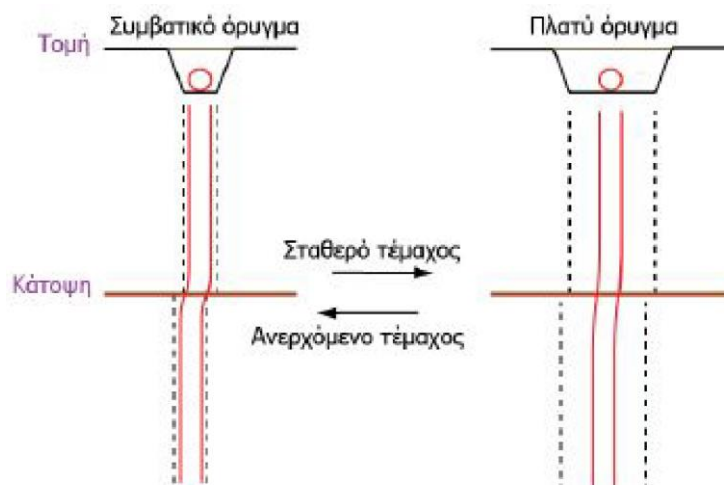
Η μείωση της αντίστασης του εδάφους που περιβάλλει τον αγωγό μπορεί να επιτευχθεί με επίχωση του ορύγματος από χαλαρά έως μετρίως πυκνά κοκκώδη υλικά, τα οποία είναι καλά διαβαθμισμένα. Το όρυγμα στο οποίο τοποθετείται ο αγωγός είναι τραπεζοειδούς διατομής (Σχήμα 1-3) και τα κοκκώδη υλικά συμβάλλουν στη μείωση της τριβής στη διεπιφάνεια αγωγού – επίχωσης. Ως αποτέλεσμα, κατά την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος, μειώνονται τα φορτία που διαβιβάζονται στον αγωγό καθώς τα χαλαρά έδαφος αναδιατάσσεται μέσα στο όρυγμα και δεν αντιστέκεται στην κίνηση του αγωγού. Η εφαρμογή αυτού του μέτρου παρουσιάζει δυσκολίες σε περίπτωση που η άμμος επίχωσης δεν είναι άμεσα διαθέσιμη, κάτι που αυξάνει σημαντικά το κόστος. Επίσης, η μέθοδος αυτή δεν κρίνεται κατάλληλη σε περιπτώσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σχετικά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, καθώς εγκυμονεί ο κίνδυνος διάβρωσης του μεταλλικού αγωγού.



Σχήμα 1-3: Διάστρωση κοκκώδους επιχώσης (Pipelines International)

### 1.2.2 Αύξηση του πλάτους του ορύγματος

Έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση του πλάτους του ορύγματος στο οποίο τοποθετείται ο αγωγός έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό των τοπικών παραμορφώσεων που δημιουργούνται κατά την ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος. Το εύρος κίνησης του αγωγού εντός του ορύγματος αυξάνεται και έτσι αποφεύγεται σε πολλές περιπτώσεις η επαφή του αγωγού με τα τοιχώματα του ορύγματος, μειώνοντας την ένταση που αναπτύσσεται στον αγωγό. Η παραμόρφωση ενός αγωγού που είναι τοποθετημένος σε πλατύτερο όρυγμα είναι περισσότερο ομοιόμορφη και το μήκος του αγωγού που καμπυλώνεται είναι μεγαλύτερο με αποτέλεσμα την αποφυγή συγκέντρωσης της έντασης λόγω μεγάλης καμπυλότητας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-4. Παρ' όλα αυτά, η υπερβολική αύξηση του πλάτους του ορύγματος ενδέχεται να οδηγήσει στην αύξηση των φορτίων στην επιφάνεια του αγωγού.



Σχήμα 1-4: Παραμόρφωση αγωγού εντός συμβατικού και πλατύτερου ορύγματος λόγω διάρρηξης ρήγματος οριζόντιας ολισθησης

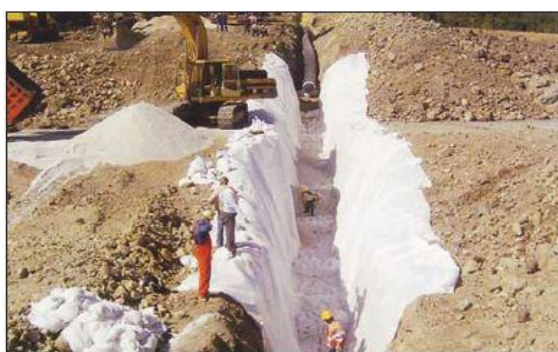
### 1.2.3 Περιέλιξη αγωγού με γεωύφασμα

Η χρήση γεωυφασμάτων είναι ένας εναλλακτικός τρόπος απομείωσης της εδαφικής αντίστασης στους υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς. Ο συγκεκριμένος τρόπος αντιμετώπισης στηρίζεται στη μειωμένη τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια γεωυφάσματος – εδάφους, αν και η αξιοπιστία αυτού του μέτρου δεν έχει αποδειχθεί μέχρι τώρα σε ικανοποιητικό βαθμό. Σύμφωνα με τους Monroy et al. [4] η επένδυση ενός αγωγού τοποθετημένου σε όρυγμα με δύο στρώσεις γεωυφάσματος είναι

αποτελεσματική ως προς την ελάττωση της εδαφικής αντίστασης μονάχα στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ αγωγού – τοιχώματος είναι μικρότερη από  $0.5D$ , όπου  $D$  είναι η διάμετρος του αγωγού. Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται η περιέλιξη ενός αγωγού με γεωύφασμα παρουσιάζεται στα Σχήματα 1-5 και 1-6.



Σχήμα 1-5: Περιέλιξη αγωγού με γεωύφασμα (De Saedeleir)



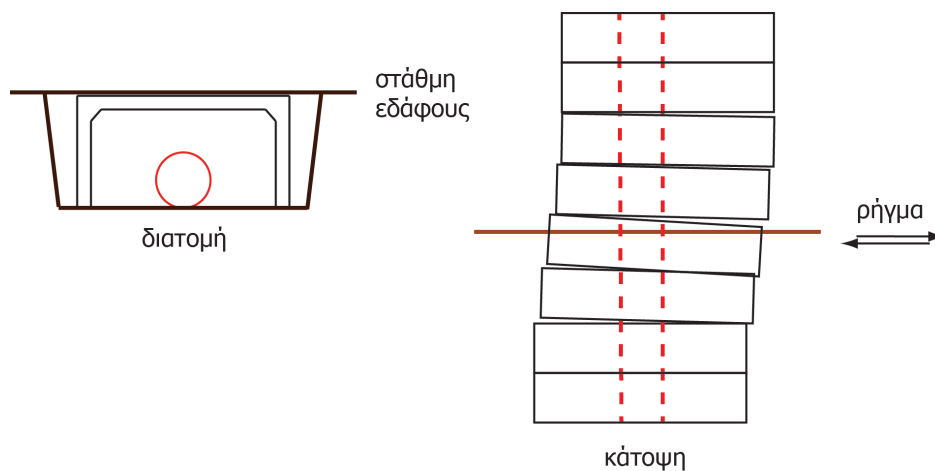
Σχήμα 1-6: Τοποθέτηση γεωυφάσματος στο όρυγμα [2]

#### 1.2.4 Χρήση ορθογωνικών οχετών (culverts)

Οι οχετοί (culverts) είναι ορθογωνικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχήμα 1-7), τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως για διελύσεις κάτω από γέφυρες και δρόμους με σκοπό τη ροή ομβρίων από το εσωτερικό τους. Πέρα όμως από αυτή τη χρήση τους, οι ορθογωνικοί οχετοί είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και ως μέτρα προστασίας των υπόγειων αγωγών έναντι σεισμικής διάρρηξης, και κυρίως έναντι ενεργοποίησης ρηγματών οριζόντιας ολίσθησης. Τα culverts είναι θαμμένα μέσα στο όρυγμα, ωστόσο δεν απαιτείται η χρήση επιχώματος καθώς ο αγωγός είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό τους και διατηρείται απαραμόρφωτος (Σχήμα 1-8). Η απουσία επιχώσης ελαχιστοποιεί τις παραμορφώσεις που οφείλονται στην τριβή της διεπιφάνειας αγωγού – εδάφους, ενώ είναι έντονες στα υπόλοιπα συνήθη μέτρα προστασίας. Επειδή τα culverts «θυσιάζονται» προκειμένου να μην παραμορφώνεται ο αγωγός και καταστρέφονται στην περίπτωση μεγάλων εδαφικών μετακινήσεων, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της κατάστασής τους και η αντικατάστασή τους σε περίπτωση βλάβης καθιστώντας τη χρήση τους αρκετά δαπανηρή.



Σχήμα 1-7: Προκατασκευασμένα ορθογωνικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα (FP McCann)

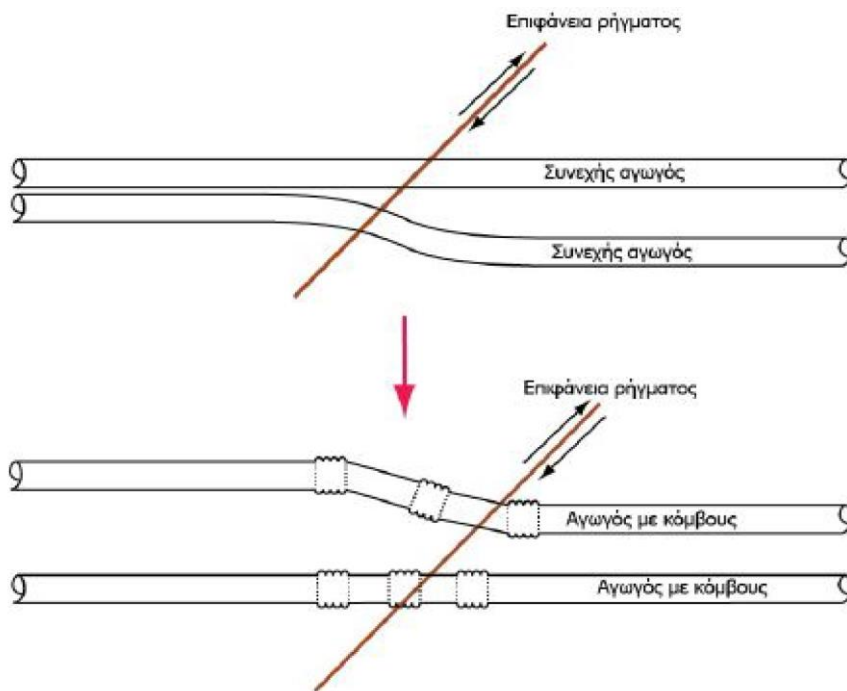


Σχήμα 1-8: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας culverts για την προστασία υπόγειου αγωγού έναντι διάρρηξης ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης

### 1.3 ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

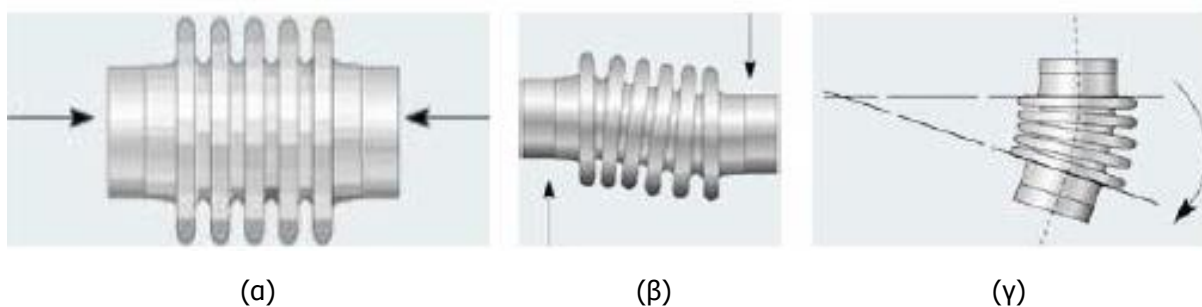
Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται μια νέα μέθοδος για την προστασία ενός χαλύβδινου αγωγού όταν υποβάλλεται σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις. Η νέα αυτή μέθοδος συνίσταται στην τοποθέτηση εύκαμπτων κόμβων (flexible joints) σε συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος του αγωγού μεταξύ των διαδοχικών χαλύβδινων τμημάτων του αγωγού ([5],[6]). Οι εύκαμπτοι κόμβοι τοποθετούνται στις θέσεις που μεγιστοποιούνται οι καμπτικές ροπές στην περιοχή του ρήγματος και συγκεντρώνουν τις αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις που δημιουργούνται από τις μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις ([7],[8]). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική απομείωση του κινδύνου αστοχίας του αγωγού λόγω συγκέντρωσης μεγάλων παραμορφώσεων, δηλαδή την αποφυγή της εφελκυστικής θραύσης των συγκολλήσεων λόγω συγκέντρωσης εφελκυστικών παραμορφώσεων και του τοπικού λυγισμού λόγω συγκέντρωσης θλιπτικών παραμορφώσεων.

Οι εύκαμπτοι κόμβοι λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις στο στατικό σύστημα του αγωγού καθώς διαθέτουν πολύ μικρή στρωφική δυσκαμψία και μετατρέπουν το συνεχές αγωγό (continuous pipeline) σε σπονδυλωτό (segmented pipeline), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-9. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των εύκαμπτων κόμβων σε διάφορες περιπτώσεις ρηγμάτων οριζόντιας ολίσθησης και ο προσδιορισμός του αποδοτικότερου συνδυασμού ως προς τις θέσεις χωροθέτησης και το πλήθος τους.



Σχήμα 1-9: Σύγκριση παραμόρφωσης συνεχούς αγωγού και αγωγού με εύκαμπτους κόμβους κατά την ενεργοποίηση σεισμικού ρήγματος

Η χρήση εύκαμπτων κόμβων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε σωληνώσεις βιομηχανιών με σκοπό την ανάληψη μετακινήσεων που οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές και υδραυλικά πλήγματα. Ο αριθμός των διαμήκων σπειρωμάτων από τα οποία αποτελείται ένας κόμβος εξαρτάται από την ένταση που καλείται να απορροφήσει, ενώ πρέπει συγχρόνως να είναι ικανός να αντέχει την εσωτερική πίεση του συστήματος. Η αξιοπιστία των κόμβων είναι επομένως δοκιμασμένη και υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ανάλογα με τη λειτουργία που καλούνται να επιτελέσουν. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-10, οι εύκαμπτοι κόμβοι έχουν δυνατότητα αξονικής, εγκάρσιας και στρωφικής παραμόρφωσης.

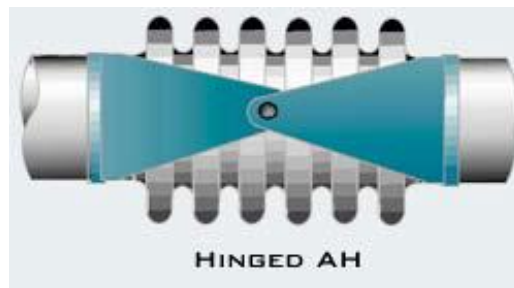


Σχήμα 1-10: Παραμόρφωση εύκαμπτου κόμβου (α) αξονική, (β) εγκάρσια και (γ) στρωφική

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των εύκαμπτων κόμβων είναι ότι είναι εμπορικά μηχανολογικά εξαρτήματα που παράγονται σύμφωνα με τις εκάστοτε κατασκευαστικές απαιτήσεις ως προς τη διάμετρο, την εσωτερική πίεση και τη μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση. Οι κατάλληλοι κόμβοι για χρήση σε υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς υψηλής πίεσης είναι μεταλλικοί τύπου bellows. Στο εμπόριο υπάρχουν δύο είδη τέτοιων κόμβων: (α) ο απλός κόμβος (single joint) με αξονική, πλευρική και στρωφική δυσκαμψία και (β) ο αρθρωτός κόμβος (hinged joint) στον οποίο επιτρέπεται μόνο η στρωφική παραμόρφωση. Η χρήση του απλού τύπου ενδείκνυται σε περιπτώσεις μικρών μετακινήσεων στις οποίες δεν είναι απαραίτητες πολυπλοκότερες διατάξεις. Στην περίπτωση αγωγών υψηλής πίεσης οι



οποίοι υπόκεινται σε ενεργοποίηση ρήγματος, ο απλός κόμβος δεν είναι κατάλληλος λόγω πολύ μικρής αξονικής και πλευρικής δυσκαμψίας και ως εκ τούτου δε δύναται να απορροφήσει τις μεγάλες μετακινήσεις που συνοδεύουν την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος. Για αυτό το λόγο στη μελέτη υπόγειων μεταλλικών αγωγών, όπως συμβαίνει και στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέγεται ο αρθρωτός κόμβος (hinged joint) στον οποίο η αξονική και η πλευρική δυνατότητα μετακίνησης είναι δεσμευμένες, ενώ η αρθρωτή διάταξη επιτρέπει μόνο τη στροφική του παραμόρφωση (Σχήμα 1-11). Σε κάθε περίπτωση είναι αναγκαίο να προσδιορίζεται η στροφική παραμόρφωση του κόμβου γιατί καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του. Η χρήση κόμβων με προκαθορισμένες προδιαγραφές επιτρέπει την ακριβέστερη γνώση της συμπεριφοράς του αγωγού και παράλληλα αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις μια οικονομικότερη λύση.



Σχήμα 1-11: Τύπος εύκαμπτου κόμβου (hinged joint) κατάλληλος για χρήση σε υπόγειο μεταλλικό αγωγό

Οι κύριες διαφορές των εύκαμπτων κόμβων σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μέτρα αντιμετώπισης συνοψίζονται ως εξής:

- Η χρήση τους επιτρέπει το σχεδιασμό αγωγών που υποβάλλονται σε μεγάλες εδαφικές μετακινήσεις. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις συγκεντρώνονται στους εύκαμπτους κόμβους και η ένταση στο υπόλοιπο τμήμα του αγωγού διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.
- Υπάρχει πλήρης συνεργασία των εύκαμπτων κόμβων με τον υπόλοιπο αγωγό η οποία εξασφαλίζεται μέσω επαρκούς συγκόλλησης, χωρίς να είναι αναγκαία η λήψη επιπρόσθετων κατασκευαστικών μέτρων.
- Οι εύκαμπτοι κόμβοι δεν αναμένεται να προκαλέσουν βλάβες στην επικάλυψη του αγωγού κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος, σε αντίθεση με τα γεωυφάσματα και τα κοκκώδη υλικά.
- Οι συνθήκες λειτουργίας του χαλύβδινου αγωγού διατηρούνται αμετάβλητες μετά την επιβολή μόνιμης εδαφικής μετακίνησης, αρκεί η στροφική παραμόρφωση του κόμβου να βρίσκεται εντός των κατασκευαστικών προδιαγραφών του.

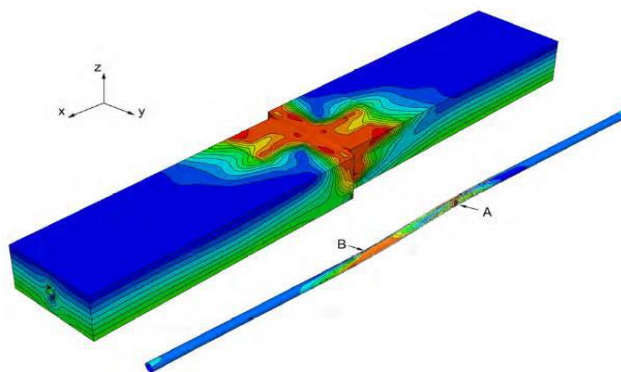
## 1.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 1.4.1 Προσομοίωση αγωγού

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς και της απόκρισης ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού κατά την ενεργοποίηση τεκτονικού ρήγματος επιτυγχάνεται μέσω της αξιόπιστης προσομοίωσης του αγωγού, της αλληλεπίδρασής του με το έδαφος και της επιβαλλόμενης εδαφικής μετακίνησης. Όλοι οι σύγχρονοι κανονισμοί, όπως είναι ο Ευρωκώδικας 8 [9], και τα πρότυπα ASCE-ALA [10] και ASCE [11], συνιστούν τη χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων (beam-type finite elements) για την προσομοίωση του αγωγού, επιβάλλοντας συγχρόνως όρια στις εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις του ([12]-[14]). Η χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των τάσεων και των παραμορφώσεων σε συγκεκριμένες θέσεις της διατομής κατά μήκος

του αγωγού. Δεν είναι, ωστόσο, εφικτή η άμεση παρατήρηση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού και της μετατροπής της διατομής του αγωγού από κυκλική σε οβάλ (ovalization). Επιπρόσθετα, η προσομοίωση του εδάφους με μετακινησιακά ελατήρια δεν επιτρέπει να ληφθούν υπόψη οι διαστάσεις του ορύγματος και οι ιδιότητες του μητρικού εδάφους εκτός του ορύγματος.

Ένας εναλλακτικός τρόπος αριθμητικής προσομοίωσης είναι το συνεχές μοντέλο (continuum model), όπου ο αγωγός προσομοιώνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell-type finite elements) και το περιβάλλον έδαφος με συμπαγή χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (3D solid finite elements). Η τριβή στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους υπεισέρχεται στο μοντέλο μέσω στοιχείων διεπαφής (contact elements – [15],[16]). Αυτή η αριθμητική προσέγγιση (Σχήμα 1-12) προσφέρει ακριβέστερη εκτίμηση μιας ενδεχόμενης αστοχίας από τοπικό λυγισμό και καλύτερη προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους ([17]-[19]). Η χρήση επιφανειακών και χωρικών στοιχείων, παρ' όλα αυτά, αυξάνει ιδιαίτερα την πολυπλοκότητα του προσομοιώματος και το υπολογιστικό κόστος ως προς το χρόνο επίλυσης, τις δυσκολίες σύγκλισης του αλγορίθμου και τον όγκο των αποτελεσμάτων. Η σύγκριση των δύο εναλλακτικών τρόπων προσομοίωσης του αγωγού οδηγεί στην υιοθέτηση του μοντέλου της δοκού επί ελατηριωτού εδάφους στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στην οποία πραγματοποιείται μεγάλο πλήθος παραμετρικών αναλύσεων.

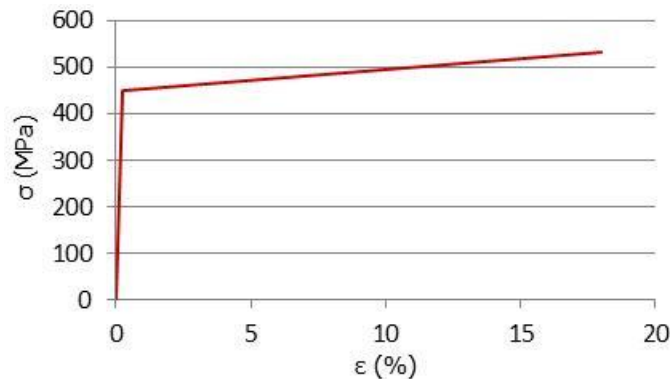


Σχήμα 1-12: Συνεχές προσομοίωμα αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους υπό σεισμική διάρρηξη [17]

Η αριθμητική επίλυση πραγματοποιείται με χρήση του εμπορικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA [20]. Ο αγωγός που μελετάται είναι κυκλικής διατομής διαμέτρου  $D=914\text{mm}$  (36in) και πάχους  $t=12.7\text{mm}$  (5in), ενώ το μήκος προσομοίωσης που υιοθετείται ισούται με  $L=1000\text{m}$ , κατόπιν αναλύσεων ευαισθησίας που προηγήθηκαν για τον προσδιορισμό του βέλτιστου μήκους προσομοίωσης. Ο φορέας διακριτοποιείται ανά  $0.25\text{m}$ , κατόπιν των αντίστοιχων αναλύσεων ευαισθησίας με στόχο την εύρεση της βέλτιστης διακριτοποίησης, λαμβάνοντας εξίσου υπόψη την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και το υπολογιστικό κόστος. Ο χάλυβας του αγωγού είναι ποιότητας API5L-X65 με ελαστικό – πλαστικό, γραμμικώς κρατυνόμενο νόμο υλικού και τα χαρακτηριστικά του παρατίθενται στον Πίνακα 1-1 και στο Σχήμα 1-13. Ο τύπος των αναλύσεων που πραγματοποιούνται είναι μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού. Η μη-γραμμικότητα γεωμετρίας συνυπολογίζεται στην ανάλυση προκειμένου να ληφθούν υπόψη φαινόμενα 2<sup>ης</sup> τάξης λόγω των μεγάλων μετακινήσεων που υφίσταται ο αγωγός, καθώς και η πρόσθετη ένταση που αναπτύσσεται στη διατομή, λόγω της οβαλοποίησης (ovalization).

Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά χάλυβα API5L-X65

Μέτρο Ελαστικότητας ( $E_1$ )	210GPa
Λόγος Poisson ( $\nu$ )	0.3
Όριο Διαρροής ( $\sigma_1$ )	448.5MPa
Όριο Θραύσης ( $\sigma_2$ )	531.0MPa
Παραμόρφωση Διαρροής ( $\epsilon_1$ )	0.213%
Παραμόρφωση Θραύσης ( $\epsilon_2$ )	18.0%



Σχήμα 1-13: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα API5L-X65

Ο σχεδιασμός ενός αγωγού έναντι μόνιμων εδαφικών παραμορφώσεων πραγματοποιείται σε όρους παραμορφώσεων (Strain Based Design – SDB), παρά σε όρους τάσεων. Ο σχεδιασμός που βασίζεται στις παραμορφώσεις είναι κατάλληλος σε περιπτώσεις στις οποίες οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις αναμένεται να υπερβούν τα κανονιστικά όρια, δεδομένου ότι τα φορτία του αγωγού ελαττώνονται μετά την παραμόρφωσή του. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού έγκειται στο γεγονός πως οι μέθοδοι που βασίζονται στις αναπτυσσόμενες τάσεις είναι πολλές φορές ιδιαίτερα ευαίσθητες ως προς τη συμπεριφορά του υλικού. Στην περίπτωση αγωγού υποκείμενου σε μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις λόγω ενεργοποίησης ρήγματος το όριο διαρροής αναμένεται να ξεπεραστεί και για αυτό ο σχεδιασμός ενδείκνυται να γίνει σε όρους παραμορφώσεων.

Η προσομοίωση του αγωγού με πεπερασμένα στοιχεία δοκού δεν επιτρέπει την άμεση παρατήρηση αστοχίας λόγω τοπικού λυγισμού ή θραύσης των συγκολλησέων του, καθώς αυτό απαιτεί τη χρήση επιφανειακών στοιχείων. Οι μεγάλες εφελκυστικές παραμορφώσεις θέτουν σε κίνδυνο κυρίως τις συγκολλητές συνδέσεις μεταξύ των διαδοχικών τμημάτων του αγωγού, ενώ οι υψηλές θλιπτικές παραμορφώσεις αυξάνουν τον κίνδυνο εμφάνισης τοπικού λυγισμού. Η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις μέγιστες αναπτυσσόμενες διαμήκεις παραμορφώσεις στο επίπεδο της διατομής με τα κανονιστικώς προτεινόμενα όρια έναντι του τοπικού λυγισμού και της εφελκυστικής θραύσης των συγκολλησέων. Στην παρούσα μελέτη υιοθετούνται οι προτεινόμενες σχέσεις του προτύπου ASCE-ALA [10]. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις δίνονται από τις εξισώσεις (1-1) και (1-2), αντίστοιχα:

$$\varepsilon_{t,limit} = 2\% \quad (1-1)$$

$$\varepsilon_{c,limit} = 0.5 \left( \frac{t}{D'} \right) - 0.0025 + 3000 \left( \frac{pD}{2Et} \right)^2 \quad \text{όπου } D' = \frac{D}{1 - 3(D - D_{min}) / D} \quad (1-2)$$

όπου  $D$  είναι η εξωτερική διάμετρος του αγωγού,  $D_{min}$  η εσωτερική διάμετρος,  $t$  το πάχος του τοιχώματος,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και  $p$  είναι η εσωτερική πίεση. Η εσωτερική πίεση δρα ανακουφιστικά έναντι της εξωτερικής εδαφικής πίεσης, ωστόσο στην παρούσα μελέτη δε λαμβάνεται υπόψη επί το δυσμενέστερο και ο τελευταίος όρος της εξίσωσης μηδενίζεται. Ως αποτέλεσμα, για τη συγκεκριμένη διατομή που εξετάζεται προκύπτει ότι το όριο των διαμήκων θλιπτικών παραμορφώσεων ( $\varepsilon_{c,limit}$ ) ισούται με 0.39%.

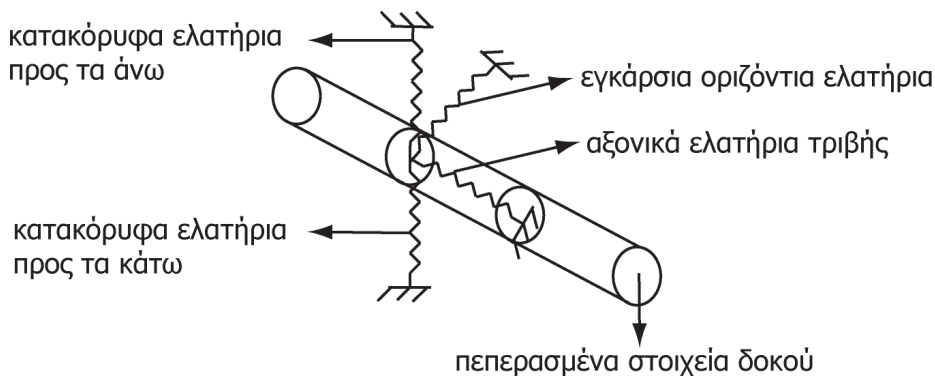
Η προσομοίωση των εύκαμπτων κόμβων μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: (α) θεωρώντας τον κόμβο ως ένα γενικό πεπερασμένο στοιχείο δοκού του οποίου το μητρώο δυσκαμψίας προκύπτει από τις σταθερές των ελατηρίων και τις κατασκευαστικές προδιαγραφές του και (β) θεωρώντας ένα σημειακό



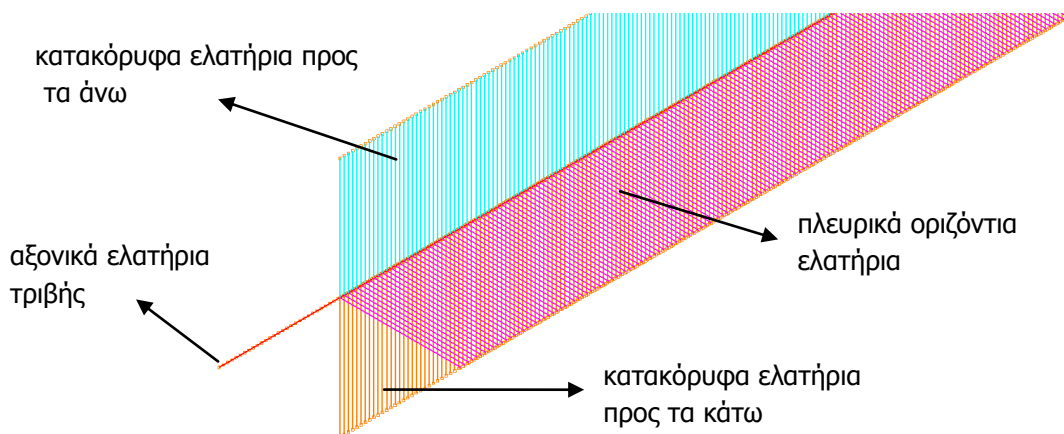
στροφικό ελατήριο μεταξύ δύο πεπερασμένων στοιχείων δοκού και αμελώντας στην ουσία το μήκος του κόμβου [21]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι κόμβοι προσομοιώνονται σημειακά μέσω ενός στροφικού ελαστικού ελατηρίου δυσκαμψίας  $0.7143\text{kNm/deg}$ , ενώ η αξονική και η πλευρική δυσκαμψία τους δεσμεύονται μέσω κατάλληλων εξισώσεων δέσμευσης.

#### 1.4.2 Προσομοίωση εδάφους

Η αριθμητική προσομοίωση του εδάφους πραγματοποιείται με μη-γραμμικά μετακινησιακά ελατήρια στις τρεις διευθύνσεις ([22],[23]), τα οποία συνδέουν τους κόμβους του αγωγού με τους αντίστοιχους «εδαφικούς» κόμβους (Σχήματα 1-14 και 1-15). Ειδικότερα, τα ελατήρια στη διαμήκη διεύθυνση του αγωγού προσομοιάζουν την τριβή στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους (axial frictional soil springs) και τα εγκάρσια οριζόντια ελατήρια την εγκάρσια εδαφική αντίσταση στη μετακίνηση του αγωγού στο όρυγμα (lateral transverse soil springs). Τα κατακόρυφα ελατήρια προς τα άνω (vertical upward soil springs) και προς τα κάτω (vertical downward soil springs) προσομοιώνουν την εδαφική αντίσταση στις μετακινήσεις του αγωγού στο κατακόρυφο επίπεδο. Τα εδαφικά χαρακτηριστικά πάνω και κάτω από τον αγωγό διαφέρουν αφού κάτωθεν του αγωγού βρίσκεται το μητρικό έδαφος, ενώ άνωθεν αυτού βρίσκεται η επίχωση η οποία συνήθως είναι χαλαρό μη-συνεκτικό έδαφος το οποίο συμπυκνώνεται ελαφρά.



Σχήμα 1-14: Προσομοίωση αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους με στοιχεία δοκού και μετακινησιακά ελατήρια



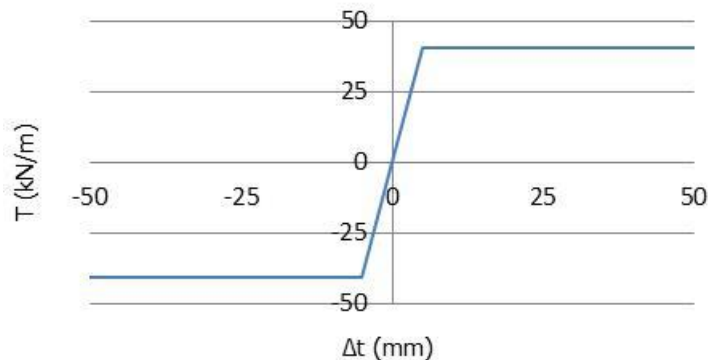
Σχήμα 1-15: Προσομοίωση αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους στο ADINA

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο υπό μελέτη αγωγός θεωρείται ότι βρίσκεται θαμμένος σε βάθος  $H=1.30\text{m}$  έως το υψηλότερο σημείο της διατομής του. Η επίχωση είναι άμμος μέσης πυκνότητας με εσωτερική γωνία τριβής  $\varphi=36^\circ$ , ειδικό βάρος  $\gamma=18\text{kN/m}^3$  και συνοχή  $c=0$ . Τα χαρακτηριστικά των

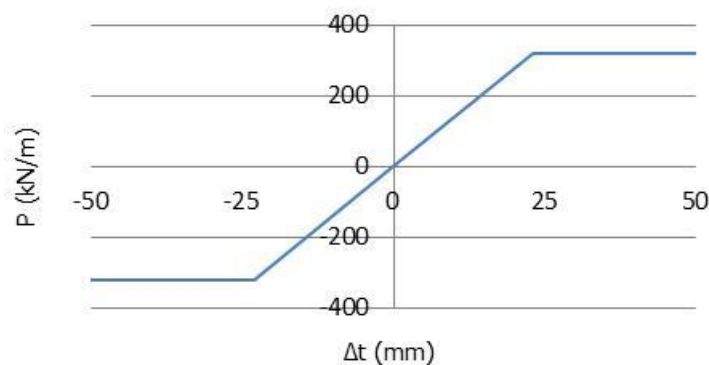
τεσσάρων ειδών εδαφικών ελατηρίων, δηλαδή η μέγιστη δύναμη και η αντίστοιχη μετατόπιση για κάθε ελατήριο, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1-2 και στα Σχήματα 1-16 έως 1-19.

Πίνακας 1-2: Χαρακτηριστικά εδαφικών ελατηρίων

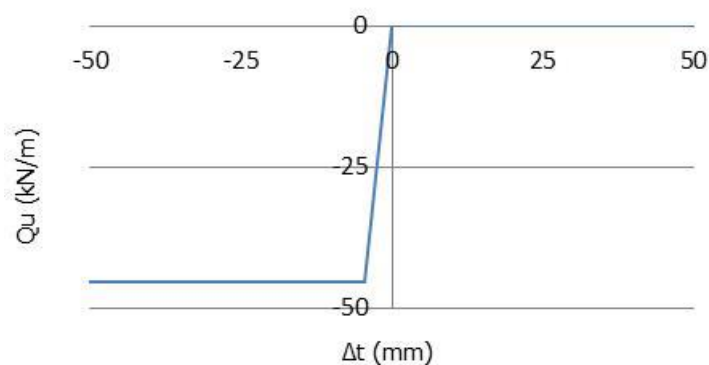
Ελατήρια	Δύναμη διαρροής (kN/m)	Μετατόπιση διαρροής (mm)
Αξονικά	40.72	5.00
Πλευρικά	320.22	23.00
Κατακόρυφα προς τα άνω	45.47	4.60
Κατακόρυφα προς τα κάτω	1494.61	114.30



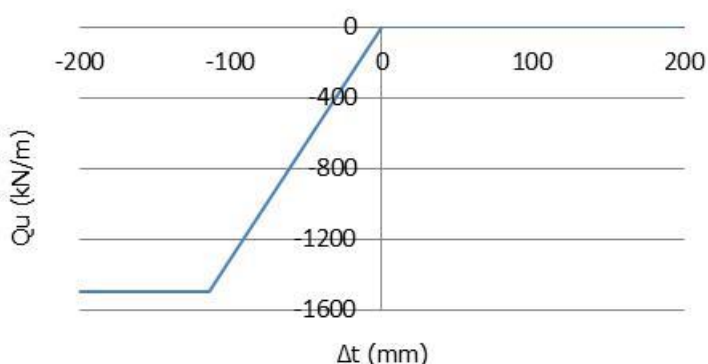
Σχήμα 1-16: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης αξονικών ελατηρίων τριβής



Σχήμα 1-17: Διάγραμμα δύναμης – μετακίνησης εγκάρσιων οριζόντιων ελατηρίων



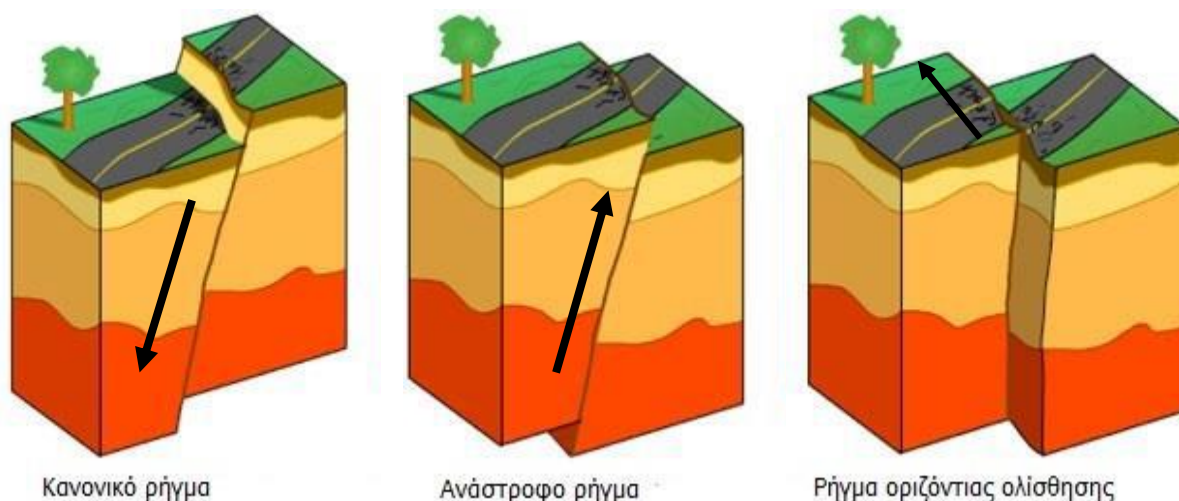
Σχήμα 1-18: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης κατακόρυφων προς τα άνω ελατηρίων



Σχήμα 1-19: Διάγραμμα δύναμης – μετατόπισης κατακόρυφων προς τα κάτω ελατηρίων

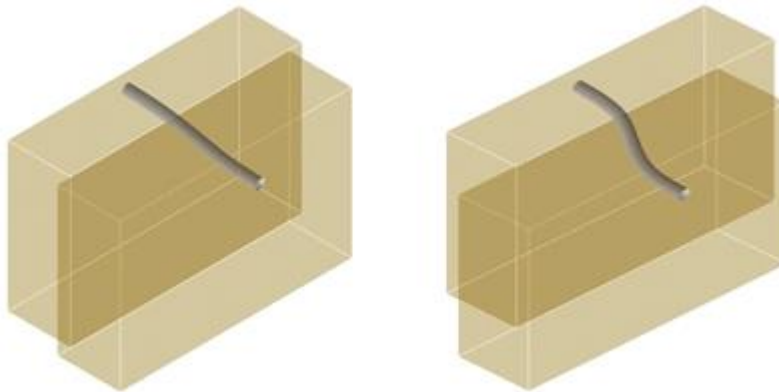
### 1.4.3 Προσομοίωση ρήγματος

Η όδευση ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού μέσα από σεισμογενείς περιοχές που περιλαμβάνουν ενεργά σεισμικά ρήγματα είναι πολλές φορές αναπόφευκτη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή του. Η ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος υποβάλλει τον αγωγό σε σύνθετη εντατική καταπόνηση και έντονη παραμόρφωση καθώς προκαλεί μόνιμες εδαφικές μετακινήσεις τις οποίες ο αγωγός είναι αναγκασμένος να ακολουθήσει. Στη φύση απαντώνται τρεις τύποι ρηγμάτων, τα κανονικά, τα ανάστροφα και τα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης. Στα κανονικά ρήγματα ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και εφελκυσμό, ενώ στα ανάστροφα ρήγματα αναπτύσσει κυρίως κάμψη και θλίψη. Τέλος, στα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης ο αγωγός αναπτύσσει κυρίως κάμψη και διάτμηση. Οι τρεις τύποι ρηγμάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-20.

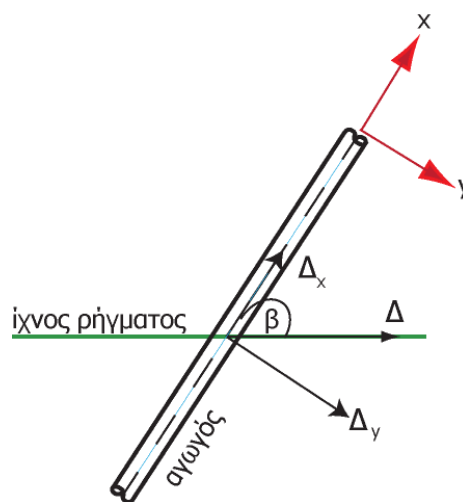


Σχήμα 1-20: Τύποι ρηγμάτων (United States Geological Survey)

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το ρήγμα που εξετάζεται είναι οριζόντιας ολίσθησης, το οποίο θεωρείται επίπεδο με μηδενικό πάχος και εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ως ευθεία γραμμή. Ο τρόπος με τον οποίο παραμορφώνεται ο αγωγός κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης απεικονίζεται στο Σχήμα 1-21. Η γωνία υπό την οποία ο αγωγός τέμνει το επίπεδο του ρήγματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-22 και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση του αγωγού κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος.



Σχήμα 1-21: Παραμόρφωση αγωγού κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης



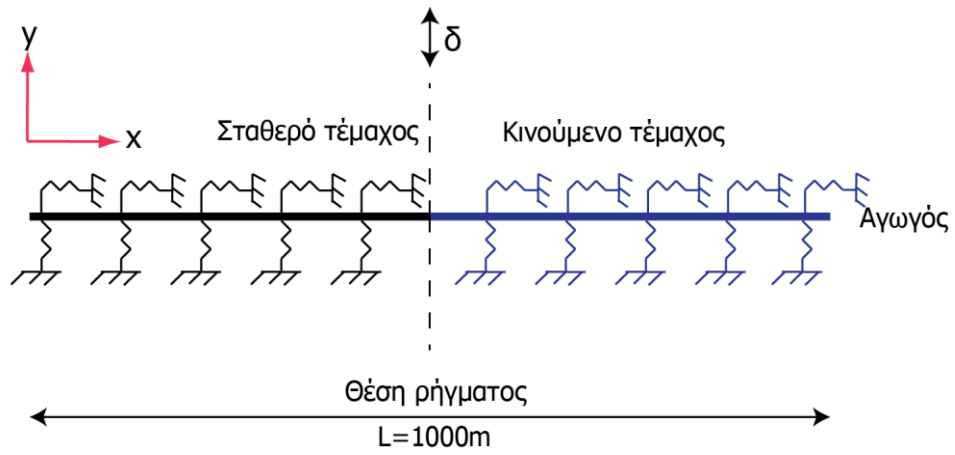
Σχήμα 1-22: Γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος ( $\beta$ )

Αναλύοντας τη μετακίνηση του ρήγματος ( $\Delta$ ) στην αξονική και εγκάρσια διεύθυνση του αγωγού προκύπτουν οι μετακινήσεις  $\Delta_x$  και  $\Delta_y$  παράλληλα και κάθετα στον αγωγό, αντίστοιχα. Οι μετακινήσεις αυτές υπολογίζονται ως ακολούθως:

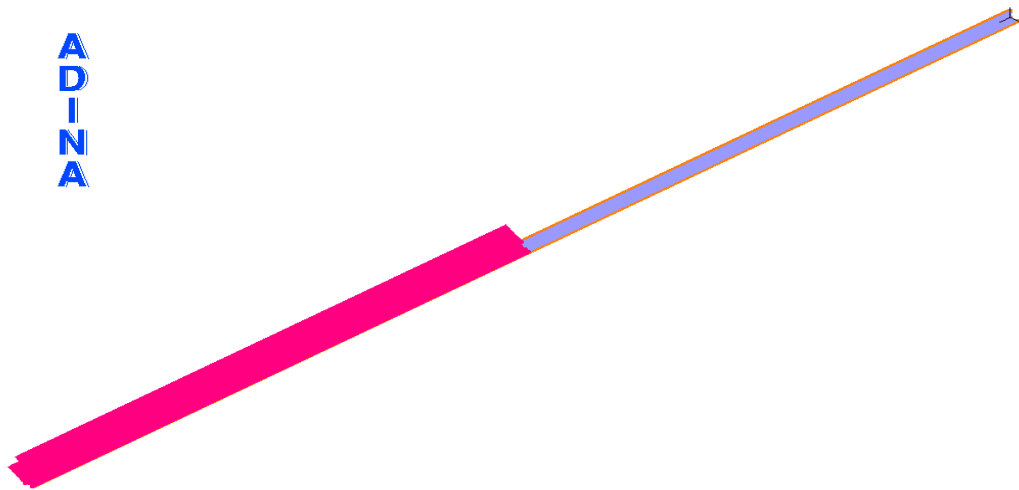
$$\Delta_x = \Delta \cos \beta \quad (1-3)$$

$$\Delta_y = \Delta \sin \beta \quad (1-4)$$

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετάται ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης οπότε η κατακόρυφη μετακίνηση του αγωγού είναι αμελητέα και δε λαμβάνεται υπόψη. Κατά την αριθμητική επίλυση, ο αγωγός θεωρείται ότι συναντάει το ρήγμα στο μέσο του μήκους του, οπότε επιβάλλονται μετακινήσεις στους κόμβους εδάφους των ελατηρίων του μισού αγωγού. Οι υπόλοιποι «εδαφικοί» κόμβοι που ανήκουν στο σταθερό τέμαχος θεωρούνται πακτωμένοι. Στο Σχήμα 1-23 παρουσιάζεται το υπό μελέτη πρόβλημα και τα εικονιζόμενα ελατήρια αντιπροσωπεύουν τα τέσσερα είδη εδαφικών ελατηρίων με τα οποία προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση αγωγού – εδάφους. Τέλος, στο Σχήμα 1-24 απεικονίζεται η φόρτιση του αγωγού στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA.



Σχήμα 1-23: Σταθερό και κινούμενο τμήμαχος κατά την προσομοίωση του αγωγού



Σχήμα 1-24: Προσομοίωση αγωγού και φόρτιση του μοντέλου στο ADINA



## 2 ΑΓΩΓΟΣ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται αγωγοί που τέμνουν ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης υπό γωνιά  $\beta < 90^\circ$  (Σχήμα 1-22). Οι αγωγοί αυτοί υπόκεινται σε κάμψη και εφελκυσμό λόγω της γεωμετρίας της διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος. Αρχικά, διερευνάται ο συνεχής αγωγός μέσω παραμετρικών αναλύσεων με σκοπό να προσδιορισθεί η επιρροή της επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος ( $\Delta$ ) και της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα ( $\beta$ ) στην απόκριση του αγωγού.

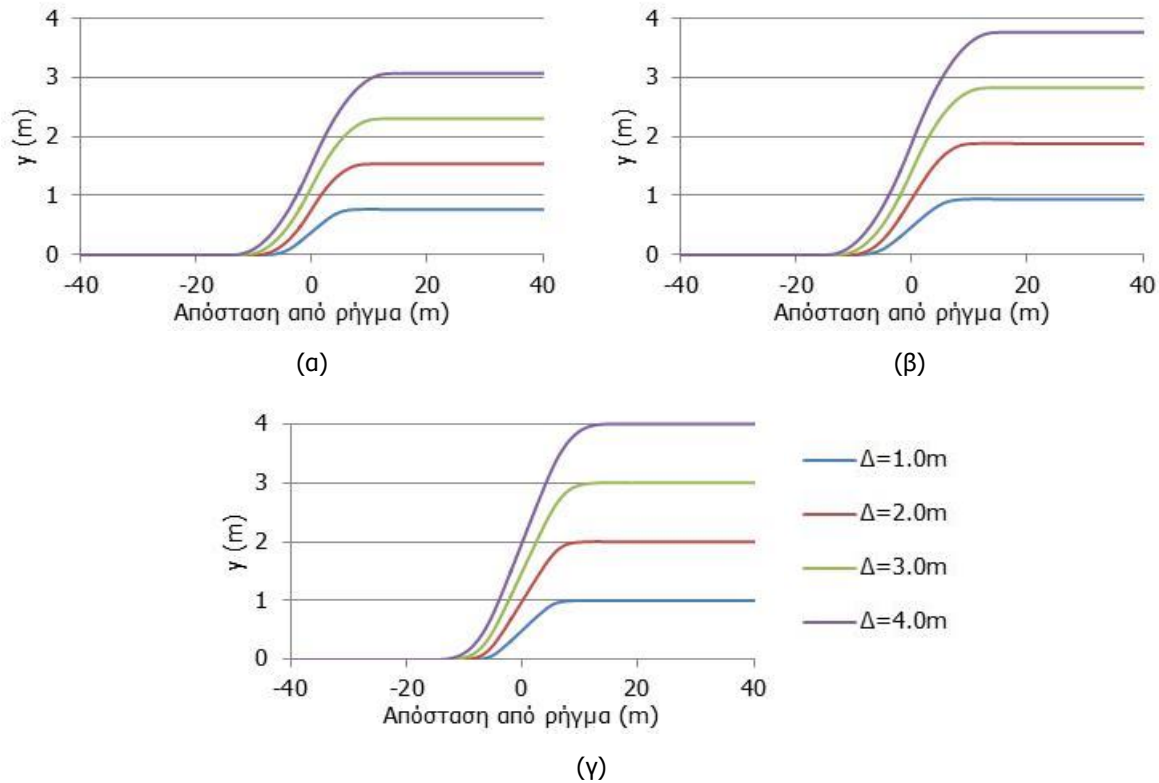
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του συνεχούς αγωγού αποτελούν τη βάση ώστε ακολούθως να εξετασθεί η αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων στη μείωση της αναπτυσσόμενης έντασης του αγωγού και κυρίως των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων. Η θέση τοποθέτησης και το πλήθος των εύκαμπτων κόμβων κατά μήκος του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος διερευνώνται συναρτήσει της επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος ( $\Delta$ ) και της γωνίας διασταύρωσης ( $\beta$ ). Παρουσιάζονται τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία τοποθετούνται οι εύκαμπτοι κόμβοι και στη συνέχεια τα αποτελέσματα με σκοπό να μελετηθεί η αποδοτικότητά τους σε κάθε περίπτωση.

Οι αγωγοί που μελετώνται θεωρείται ότι τέμνονται από το σεισμικό ρήγμα στο μέσον του μήκους τους που προσομοιώνεται, αμελώντας την αβεβαιότητα σχετικά με τη θέση εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης στην επιφάνεια του εδάφους. Ανάλογα με την έκταση κατά μήκος του αγωγού στην οποία αναπτύσσεται το εκάστοτε εντατικό μέγεθος, σε κάθε διάγραμμα τα όρια του οριζόντιου άξονα είναι διαφορετικά ώστε να διευκολύνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων.

### 2.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

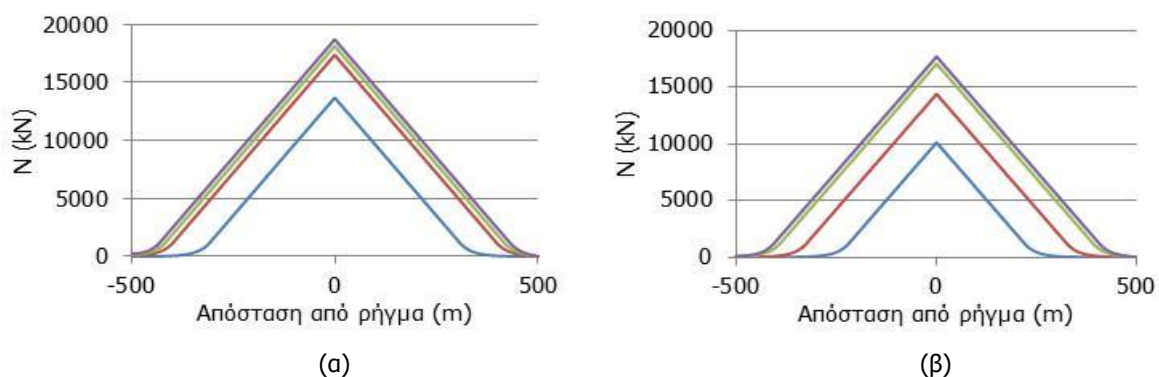
Η επίδραση της επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος ( $\Delta$ ) στην απόκριση του συνεχούς αγωγού μελετάται για τρεις χαρακτηριστικές γωνίες διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα: (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$ . Σε κάθε περίπτωση επιβάλλονται 4 ενδεικτικές τιμές μετακίνησης, οι οποίες κυμαίνονται από  $\Delta=1.0\text{m}$  έως  $\Delta=4.0\text{m}$ .

Αρχικά, στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού, υποκείμενου σε ενεργοποίηση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Το συνολικό μήκος του αγωγού που καμπυλώνεται αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$ . Το παραμορφωμένο σχήμα του αγωγού είναι μία ομαλή καμπύλη τύπου «S».

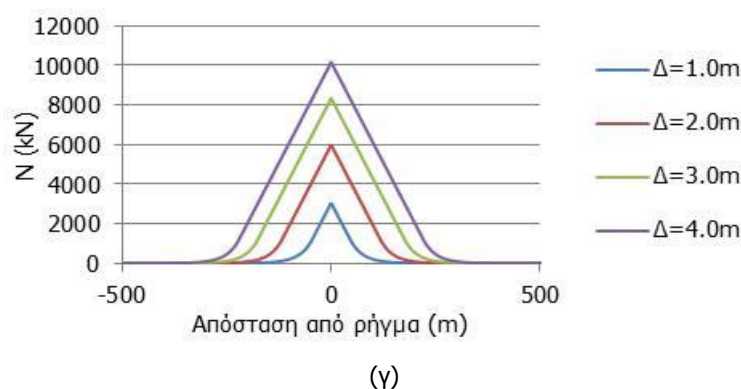


Σχήμα 2-1: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$

Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων ( $N$ ) κατά μήκος του αγωγού. Η αξονική δύναμη μεγιστοποιείται στη θέση του ίχνους του ρήγματος και ελαττώνεται προοδευτικά μακριά από αυτό λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους. Η κλίση του διαγράμματος είναι σταθερή στο μεγαλύτερο μήκος και οι γραμμές που αντιστοιχούν σε διαφορετικές στάθμες επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος είναι παράλληλες μεταξύ τους. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης παρατηρείται πως οδηγεί σε αύξηση των αξονικών εφελκυστικών δυνάμεων, ωστόσο για σχετικά μικρές γωνίες διασταύρωσης  $\beta$ , όπως είναι η γωνία  $\beta=50^\circ$ , παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους παρά την αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης.

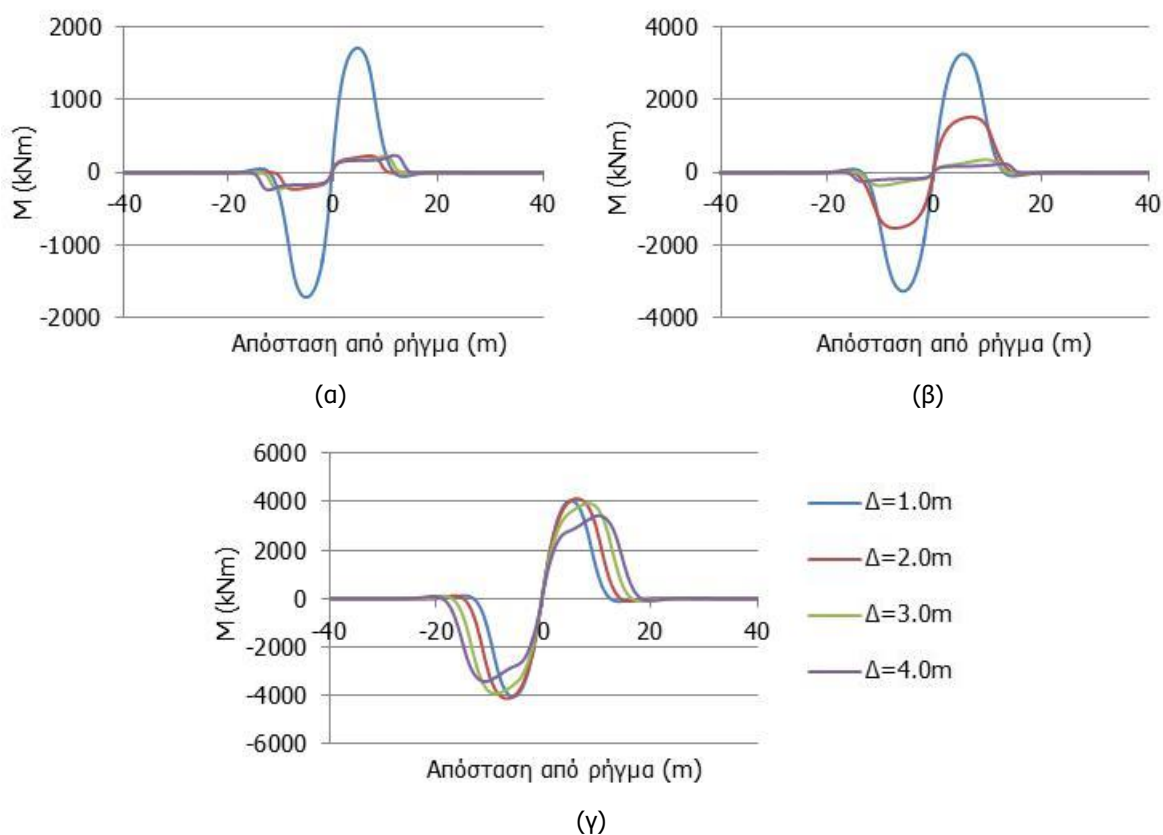






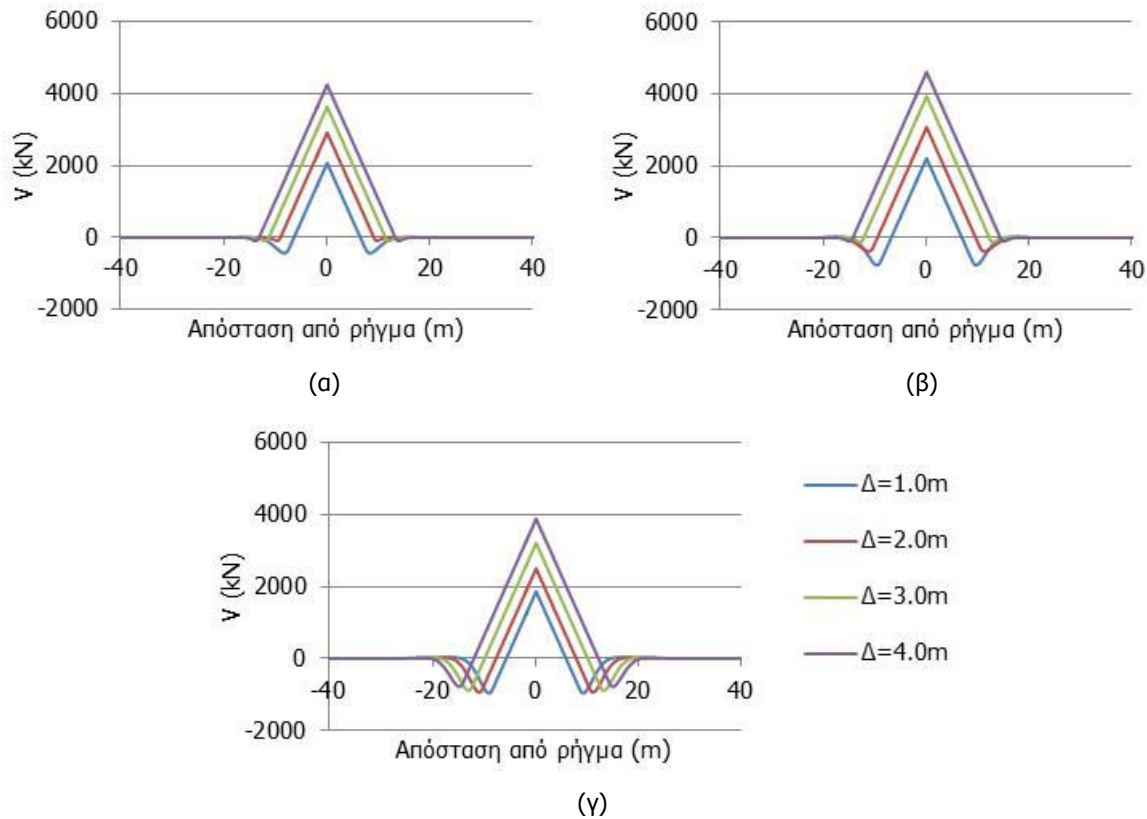
Σχήμα 2-2: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 2-3 απεικονίζεται η κατανομή των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών (M) κατά μήκος του αγωγού. Στην περίπτωση της γωνίας διασταύρωσης  $\beta=90^\circ$ , όπου ο αγωγός υφίσταται κυρίως καμπτική ένταση, η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης οδηγεί αρχικά σε μικρή αύξηση των καμπτικών ροπών, ωστόσο για μετακινήσεις μεγαλύτερες των 2.0m παρατηρείται μείωση των καμπτικών ροπών, καθώς πλέον κυριαρχεί η αξονική καταπόνηση. Επιπλέον, όταν αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης αυξάνεται και το καμπτόμενο μήκος του αγωγού. Αντιθέτως, στις μικρότερες γωνίες διασταύρωσης  $\beta=50^\circ$  και  $\beta=70^\circ$  όπου κυριαρχεί η εφελκυστική καταπόνηση, η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης οδηγεί σε σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών στον αγωγό.



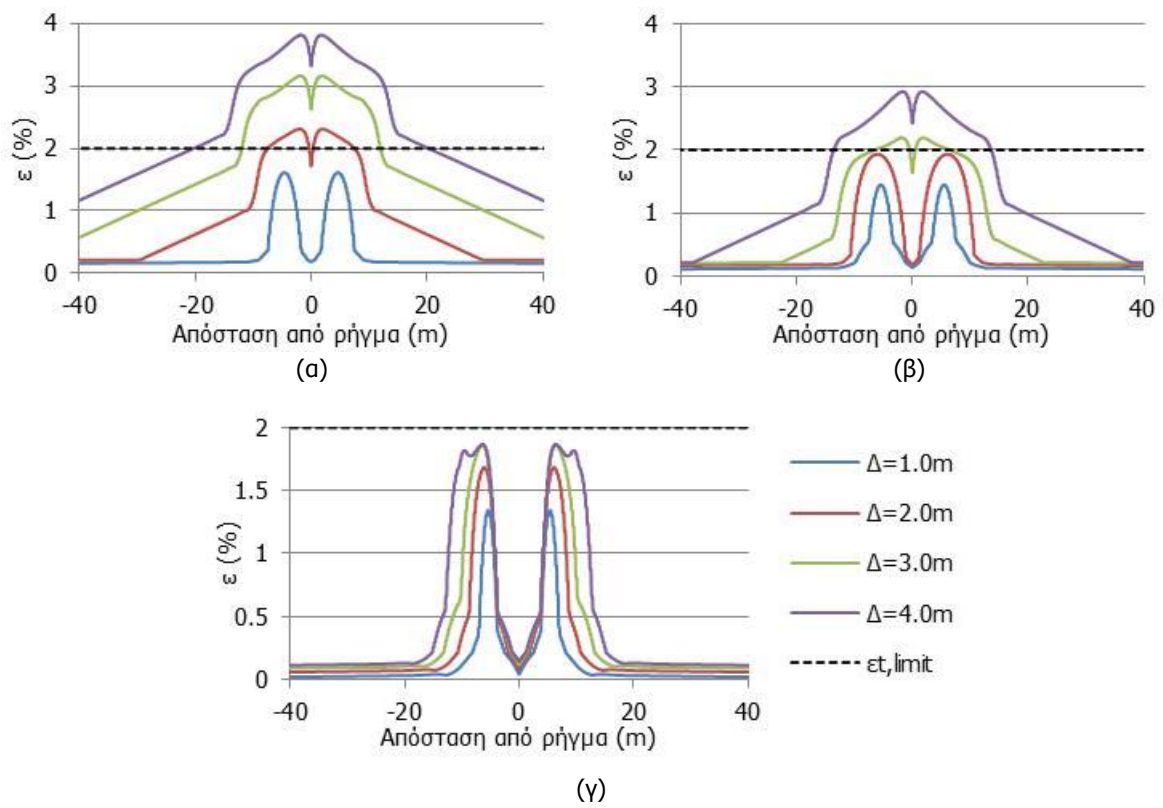
Σχήμα 2-3: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$

Η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων ( $V$ ) κατά μήκος του αγωγού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-4. Οι αξονικές δυνάμεις παρουσιάζουν μέγιστο στην περιοχή του ρήγματος και η καμπτική ένταση διαδραματίζει πλέον λιγότερο σημαντικό ρόλο σε σχέση με τον εφελκυσμό. Επομένως οι τέμνουσες δυνάμεις, ως κλίση του διαγράμματος ροπών, συμπεριφέρονται αναλόγως. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης διαπιστώνεται πως οδηγεί σε αύξηση των τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται στον αγωγό στην περιοχή του ρήγματος.

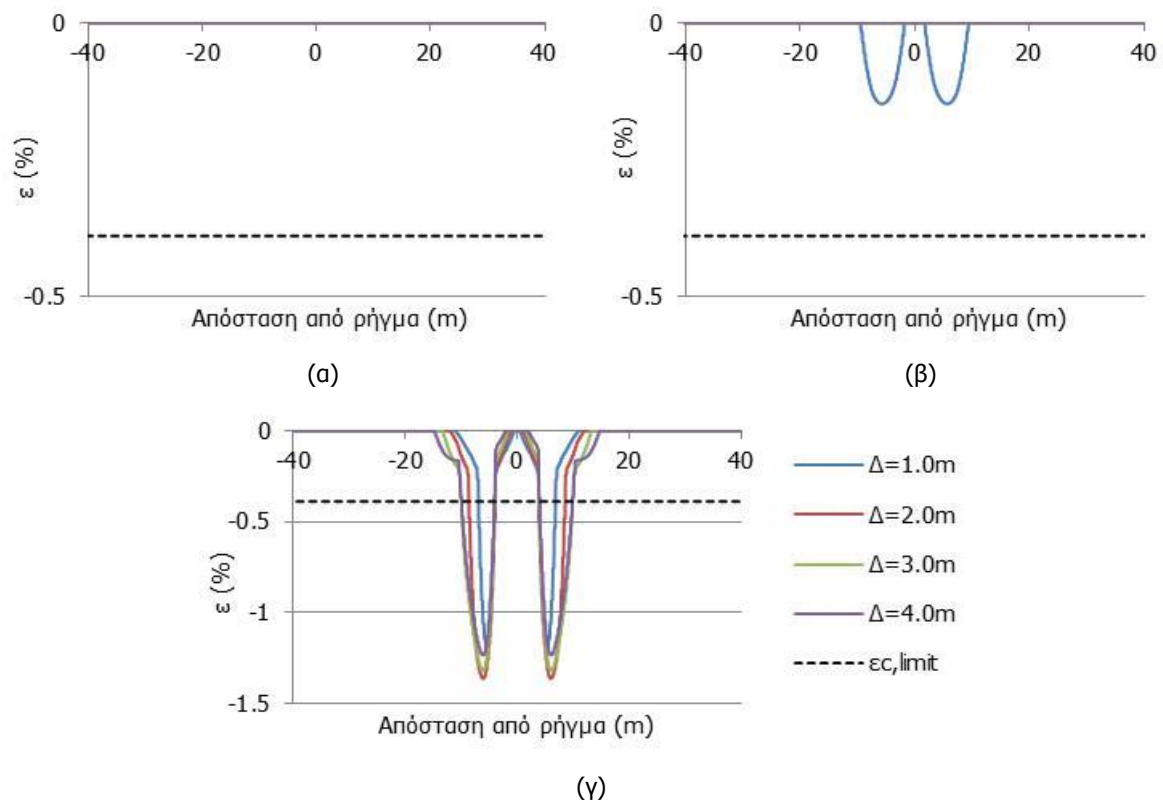


Σχήμα 2-4: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$

Στο Σχήμα 2-5 και στο Σχήμα 2-6 παρουσιάζεται η κατανομή των εφελκυστικών και των θλιπτικών, αντίστοιχα, διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του αγωγού. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  (Σχήμα 2-5) οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων για όλες τις γωνίες διασταύρωσης  $\beta$ . Μάλιστα στις περιπτώσεις  $\beta=50^\circ$  και  $\beta=70^\circ$  και για ορισμένες τιμές της μετακίνησης οι ανηγμένες παραμορφώσεις ξεπερνούν το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας με άμεσο κίνδυνο για την ακεραιότητα των συγκολλήσεων του αγωγού ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ). Αντίθετα, στις εξεταζόμενες γωνίες διασταύρωσης  $\beta$  δεν παρατηρείται κίνδυνος τοπικού λυγισμού για τις τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  που εξετάζονται, σύμφωνα με το Σχήμα 2-6. Οι θλιπτικές διαμήκεις ανηγμένες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε αυτές τις γωνίες είναι μικρότερες του αντίστοιχου κανονιστικού ορίου ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ), και μειώνονται καθώς αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  επειδή σε αυτές τις γωνίες κυριαρχεί ο εφελκυσμός. Κίνδυνος παρατηρείται μόνο στην περίπτωση που η γωνία διασταύρωσης είναι  $\beta=90^\circ$ , όπου κυριαρχεί η κάμψη, καθώς οι ανηγμένες παραμορφώσεις υπερβαίνουν κατά πολύ τα αντίστοιχα κανονιστικά όρια, για όλες τις τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$ .

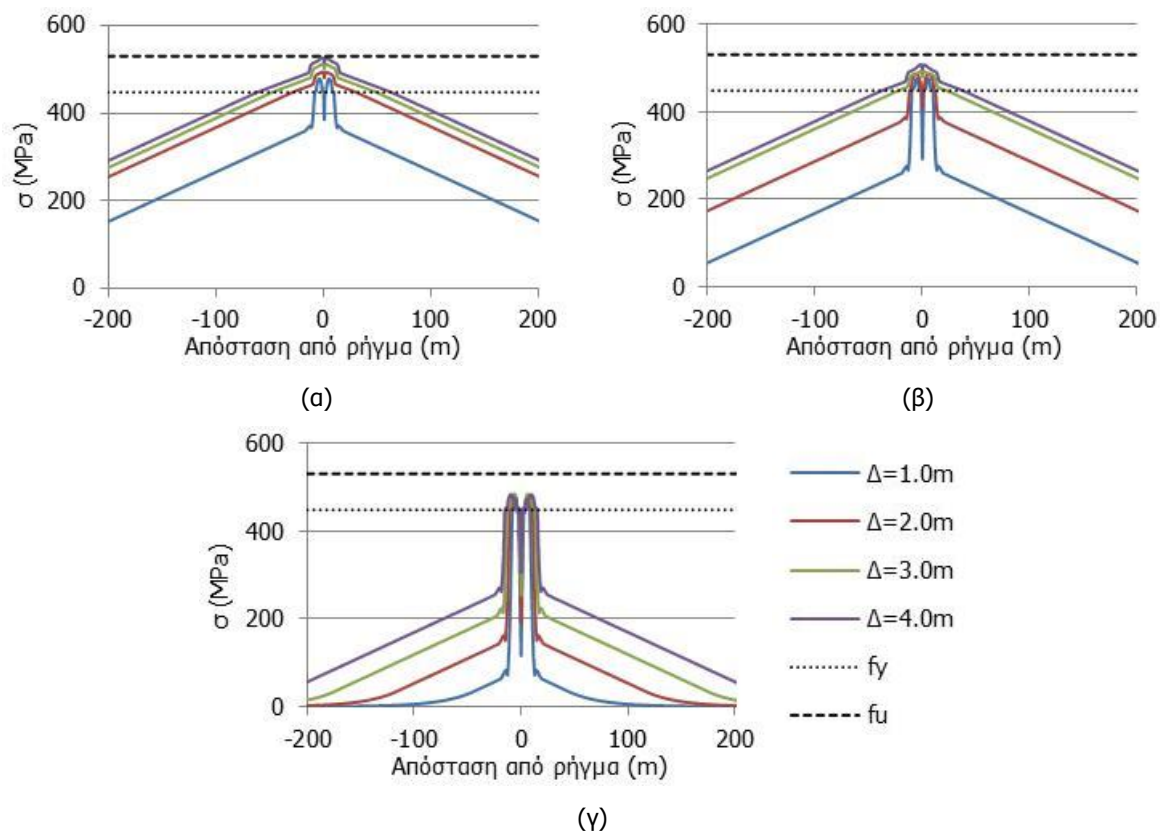


Σχήμα 2-5: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$



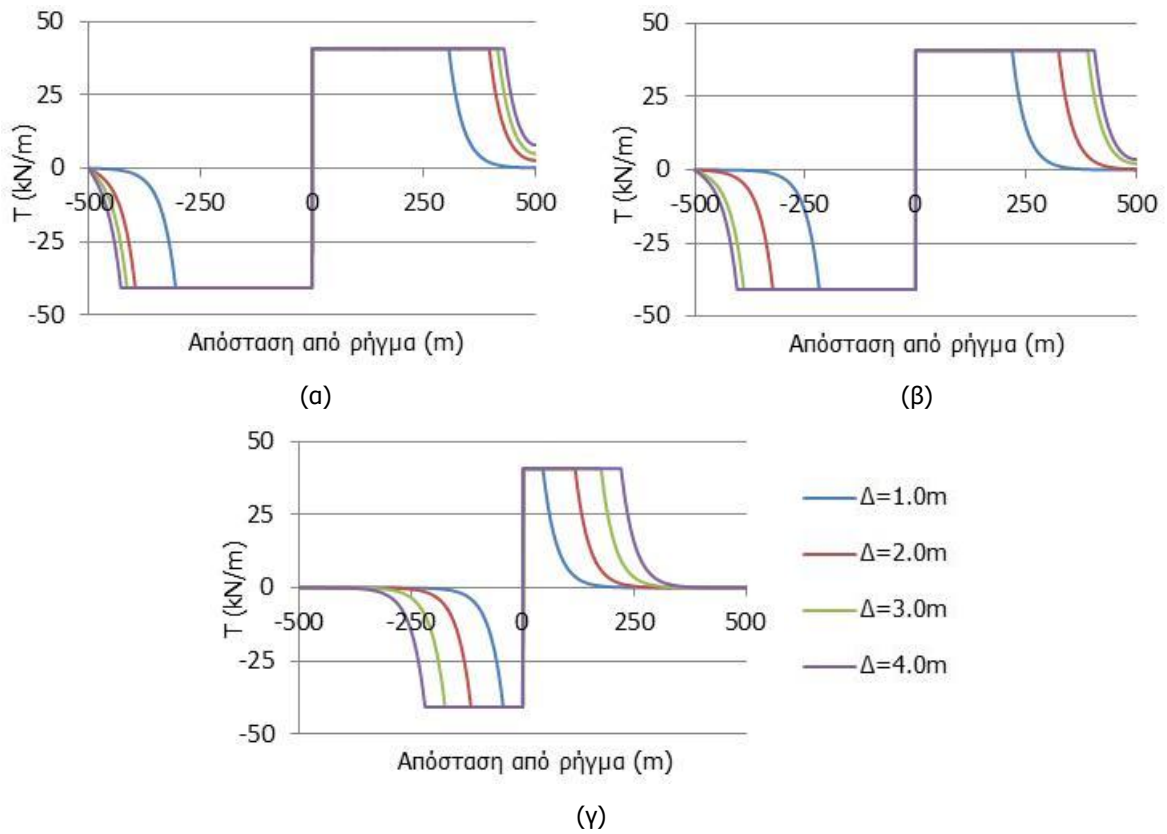
Σχήμα 2-6: Κατανομή θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$

Η κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-7, από το οποίο προκύπτει ότι οι τάσεις μεγιστοποιούνται στην περιοχή του ρήγματος και υπερβαίνουν στις περισσότερες περιπτώσεις το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ). Ειδικότερα στην περίπτωση της γωνίας  $\beta=50^\circ$ , οι αναπτυσσόμενες τάσεις προσεγγίζουν την τάση θραύσης του χάλυβα ( $f_u=531.00\text{MPa}$ ). Η υπέρβαση, ωστόσο, του ορίου διαρροής για το χάλυβα δεν προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία δεδομένης της κράτυνσης του υλικού και κυρίως της μεγάλης του ολκιμότητας. Στην περιοχή του ρήγματος ο αγωγός «στρίβει» σύμφωνα με τον παραμορφωμένο φορέα (Σχήμα 2-1) και αυτό οδηγεί σε πτώση των αναπτυσσόμενων τάσεων στη συγκεκριμένη περιοχή. Σημειώνεται πως η αύξηση των επιβαλλόμενων μετακινήσεων προκαλεί αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά μήκος του αγωγού σε όλες τις περιπτώσεις.

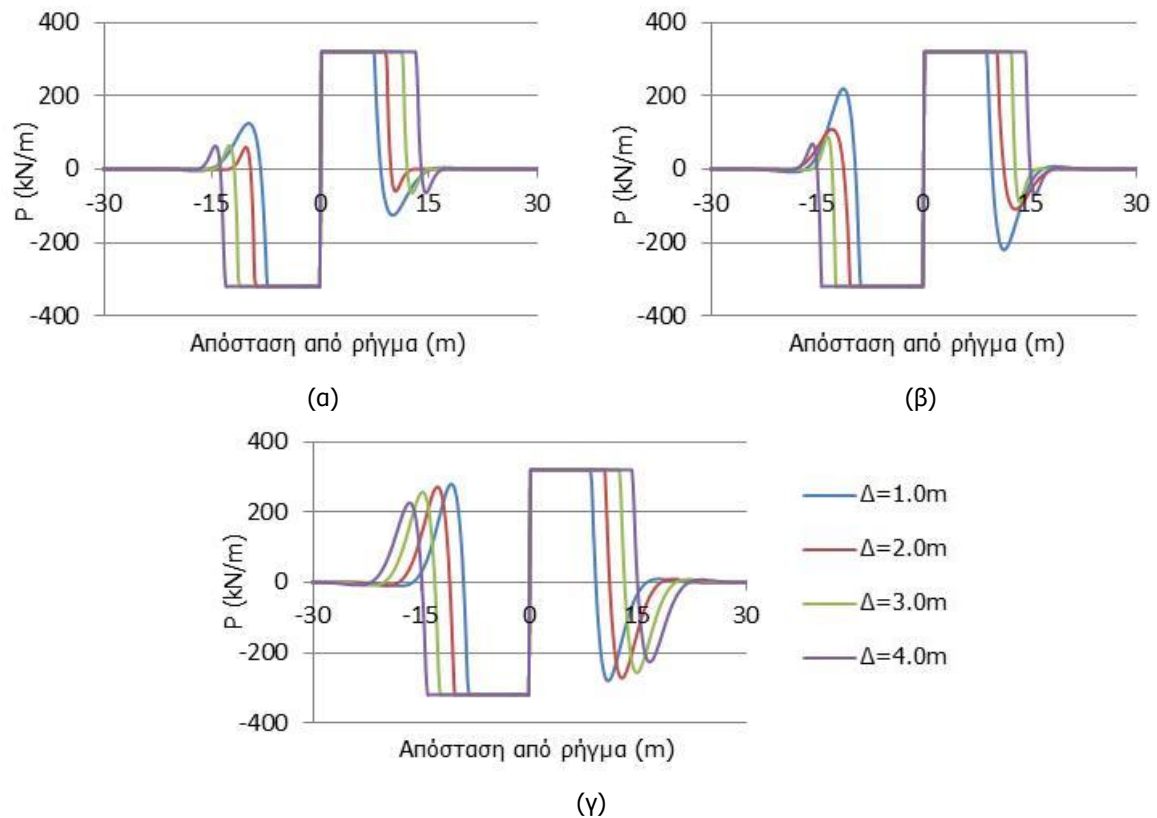


Σχήμα 2-7: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$

Στα Σχήματα 2-8 και 2-9 παρουσιάζεται η κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (P), αντίστοιχα, από τα οποία προκύπτει το εύρος πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιοχή του σεισμικού ρήγματος κατά μήκος του αγωγού. Συγκεκριμένα, η πλαστικοποίηση του εδάφους εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος όταν η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  αυξάνεται, σύμφωνα με το Σχήμα 2-8. Στην περίπτωση όμως της γωνίας διασταύρωσης  $\beta=50^\circ$ , η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης πάνω από την τιμή των 2.0m δεν προκαλεί σημαντική αύξηση του εύρους πλαστικοποίησης του εδάφους. Τέλος, οι εδαφικές δυνάμεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-9 αποτελούν την εδαφική αντίσταση καθώς ο αγωγός μετακινείται μέσα στο όρυγμα λόγω της διάρρηξης και «πιέζει» το έδαφος, δηλαδή εξαρτώνται από τη μετακίνηση του αγωγού στο όρυγμα. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι διαφορές στις εδαφικές δυνάμεις είναι ανάλογες της μετακίνησης του ρήγματος (Σχήμα 2-1).



Σχήμα 2-8: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$



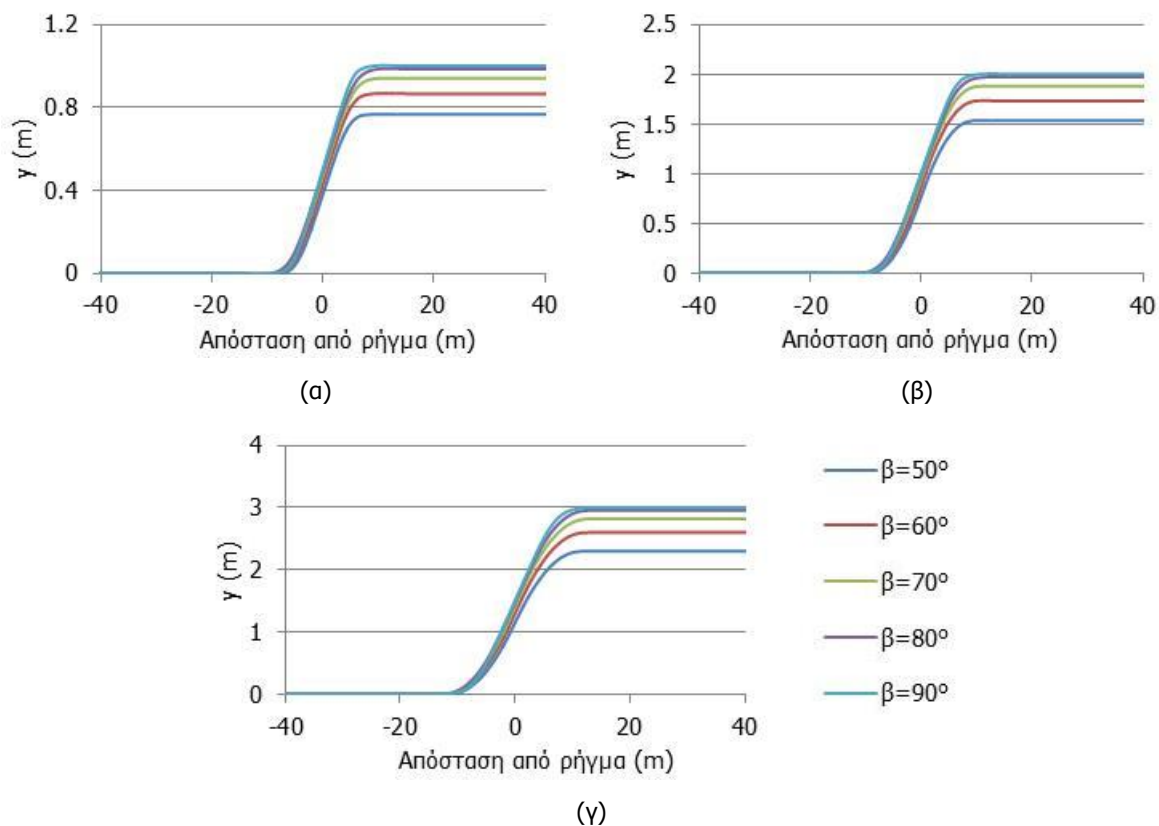
Σχήμα 2-9: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=50^\circ$ , (β)  $\beta=70^\circ$  και (γ)  $\beta=90^\circ$



### 2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ – ΡΗΓΜΑΤΟΣ

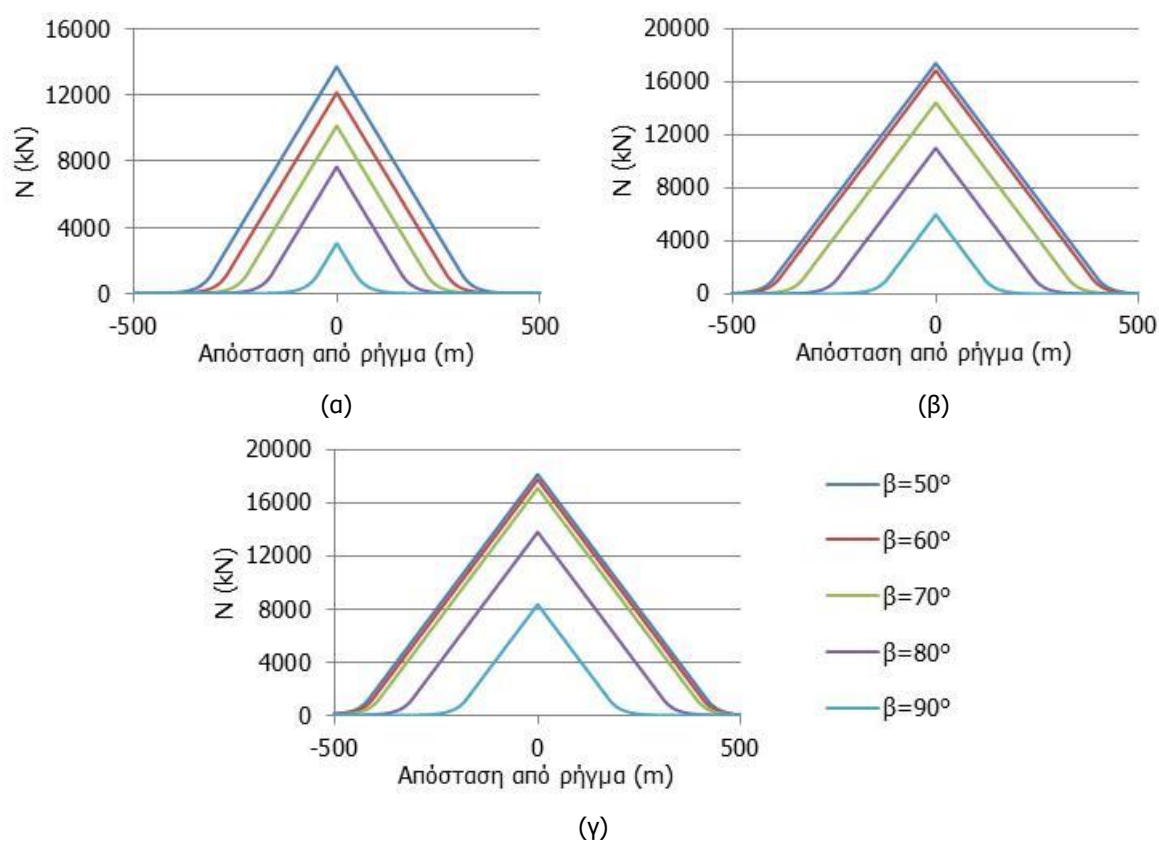
Στην παράγραφο αυτή μελετάται η επίδραση της γωνίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος ( $\beta$ ) στην απόκριση του συνεχούς αγωγού για τρεις διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$ . Εξετάζονται οι περιπτώσεις για 5 διαφορετικές γωνίες διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, από  $\beta=50^\circ$  έως  $\beta=90^\circ$ .

Αρχικά, στο Σχήμα 2-10 παρουσιάζεται η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού, υποκείμενου σε ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Η παραμόρφωση του αγωγού είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η γωνία διασταύρωσης  $\beta$ , δεδομένου ότι οι μικρότερες γωνίες διασταύρωσης οδηγούν σε μεγαλύτερη εφελκυστική καταπόνηση του αγωγού. Αυτό διαπιστώνεται αν η επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta$  αναλυθεί σε δύο συνιστώσες (Σχήμα 1-22), εκ των οποίων η παράλληλη με τον αγωγό συνιστώσα εντείνει αξονικά τον αγωγό.



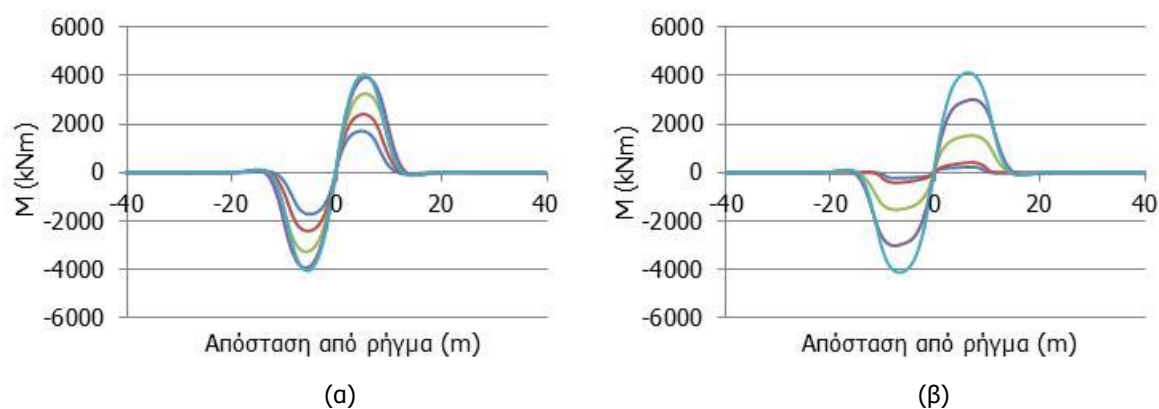
Σχήμα 2-10: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$

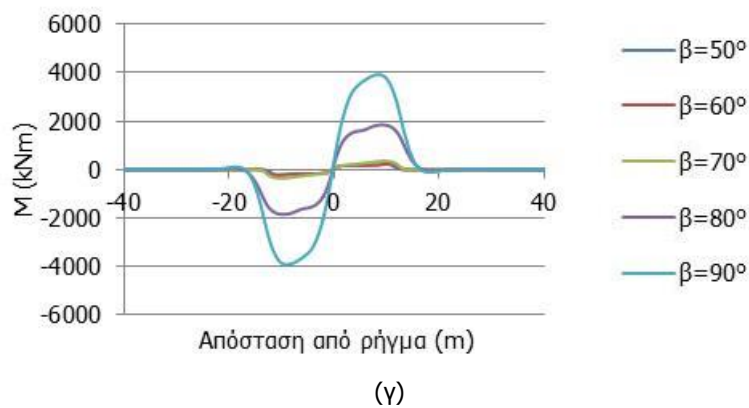
Στο Σχήμα 2-11 παρουσιάζεται η κατανομή των αξονικών δυνάμεων ( $N$ ) κατά μήκος του αγωγού, όπου διαπιστώνεται πως για την ίδια τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  οι αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες στα ρήγματα με μικρές γωνίες διασταύρωσης  $\beta$ , καθώς η παράλληλη με τον αγωγό συνιστώσα της μετακίνησης αυξάνεται και άρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες εφελκυστικές δυνάμεις. Επιπλέον, στα αποτελέσματα των μικρότερων γωνιών διασταύρωσης  $\beta$ , και συγκεκριμένα στις γωνίες  $\beta=50^\circ$ ,  $\beta=60^\circ$  και  $\beta=70^\circ$ , δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στις τιμές της αξονικής για μετακίνηση ρήγματος  $\Delta=3.0\text{m}$ .



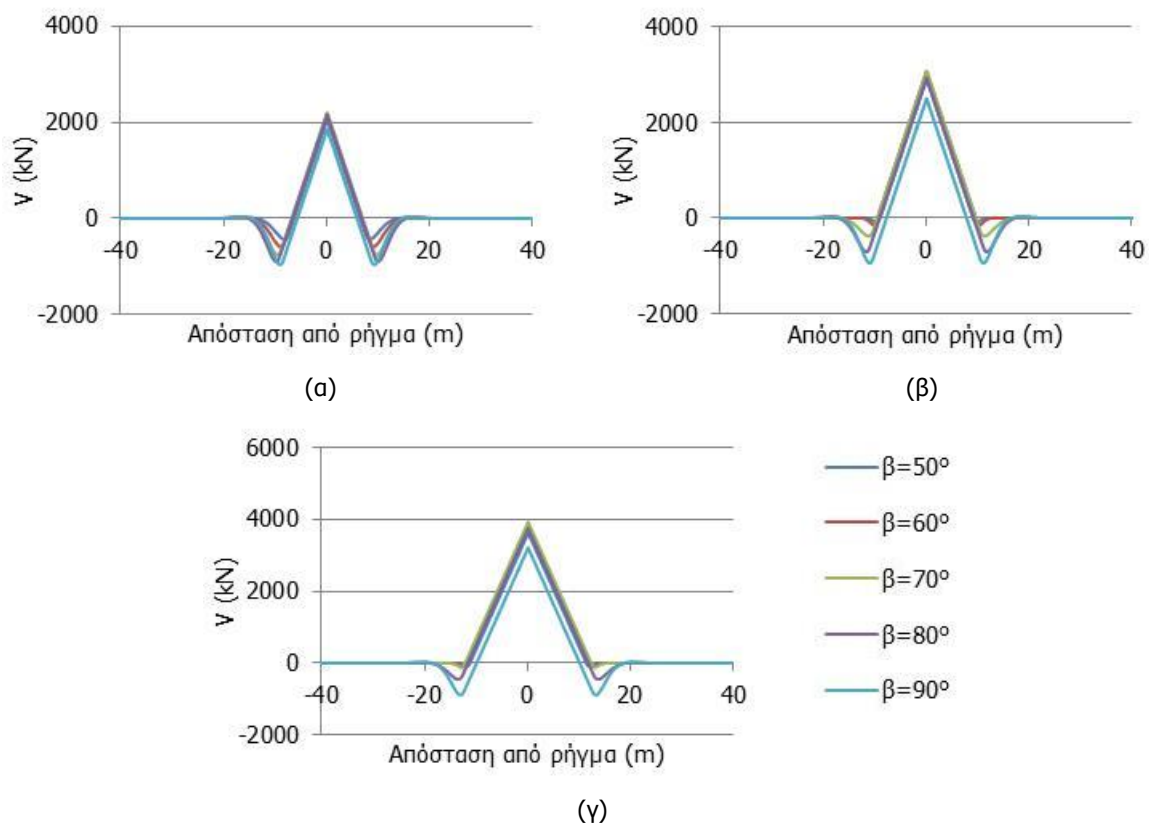
Σχήμα 2-11: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$

Η κατανομή των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών ( $M$ ) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-12, ενώ στο Σχήμα 2-13 απεικονίζεται η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων ( $V$ ) κατά μήκος του αγωγού. Οι καμπτικές ροπές αυξάνονται όσο μεγαλώνει η γωνία διασταύρωσης  $\beta$ , δηλαδή σε περιπτώσεις στις οποίες η κάμψη υπερσχύει έναντι της εφελκυστικής έντασης. Ωστόσο, στις περιπτώσεις μικρών γωνιών διασταύρωσης  $\beta$  και μεγάλων τιμών της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-12(γ), παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές καμπτικών ροπών και τα αποτελέσματα δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Από το Σχήμα 2-13 προκύπτει ότι η γωνία διασταύρωσης  $\beta$  δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων στην περιοχή του ρήγματος.





Σχήμα 2-12: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$

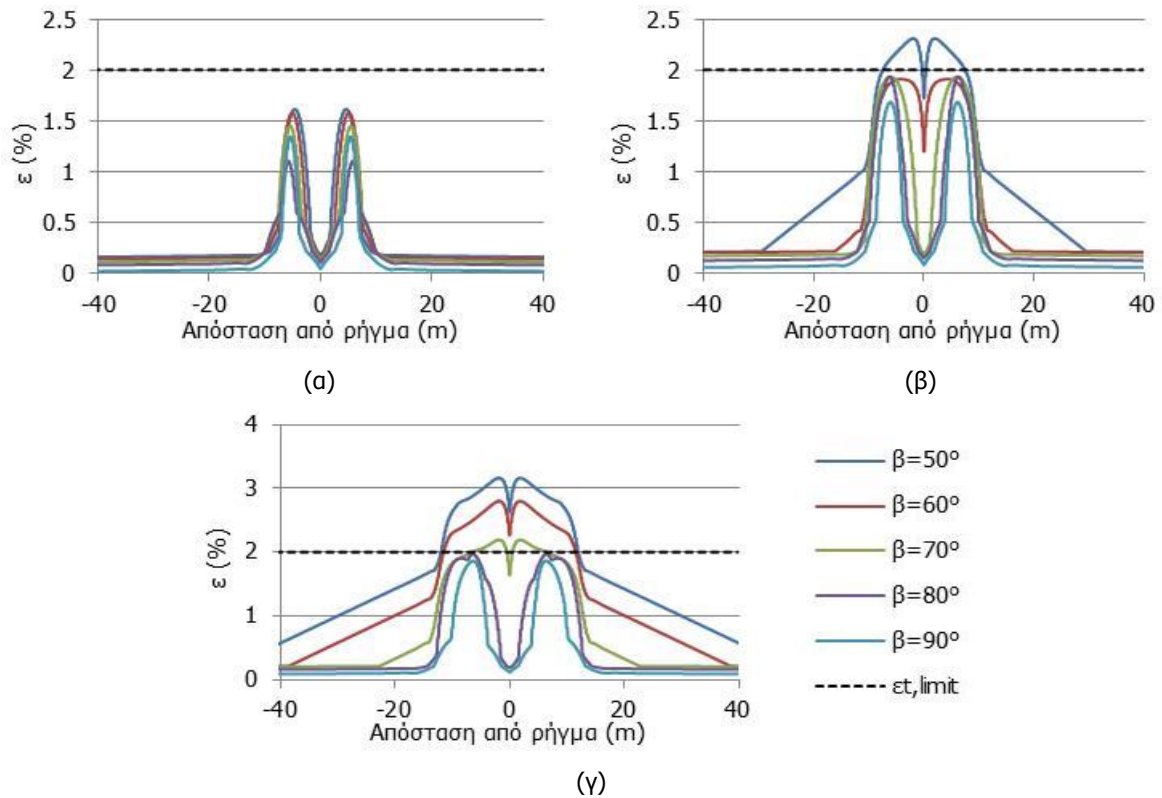


Σχήμα 2-13: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$

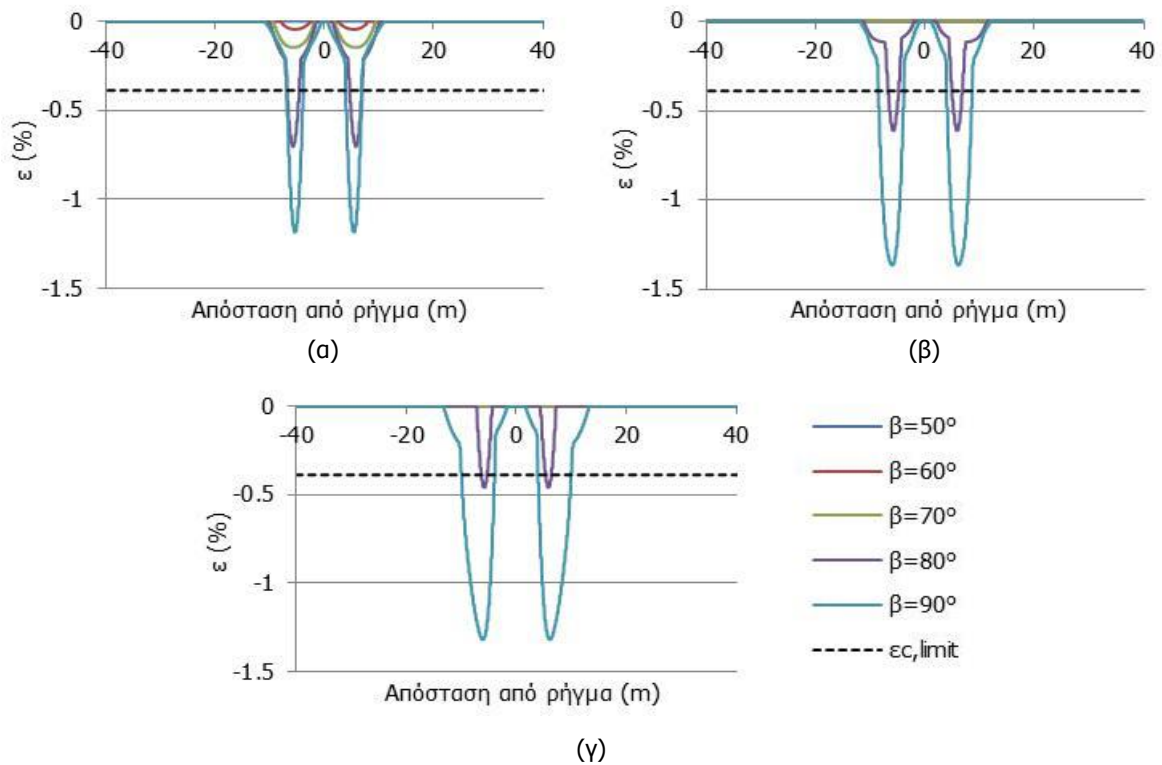
Στο Σχήματα 2-14 και 2-15 παρουσιάζεται η κατανομή των εφελκυστικών και των θλιπτικών, αντίστοιχα, διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του αγωγού. Από το Σχήμα 2-14 προκύπτει ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις αυξάνονται όσο μειώνεται η γωνία διασταύρωσης  $\beta$ . Ειδικότερα, στις μικρές γωνίες  $\beta$  και για μεγάλες τιμές της μετακίνησης  $\Delta$  οι ανηγμένες παραμορφώσεις υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο για προστασία έναντι θραύσης των συγκολλήσεων του αγωγού ( $\epsilon_{t,limit}=2$ ). Αντίθετα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-15, οι θλιπτικές παραμορφώσεις έχουν υψηλές τιμές για τις μεγαλύτερες γωνίες διασταύρωσης  $\beta$  και μάλιστα στις περιπτώσεις  $\beta=80^\circ$  και  $\beta=90^\circ$  υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο για τοπικό λυγισμό ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39$ ). Κίνδυνος τοπικού λυγισμού δεν παρατηρείται στις περιπτώσεις που η γωνία διασταύρωσης είναι  $\beta < 70^\circ$ . Συμπεραίνεται, επομένως, ότι η



μείωση της γωνίας διασταύρωσης  $\beta$  οδηγεί σε αύξηση των εφελκυστικών και σε μείωση των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού.

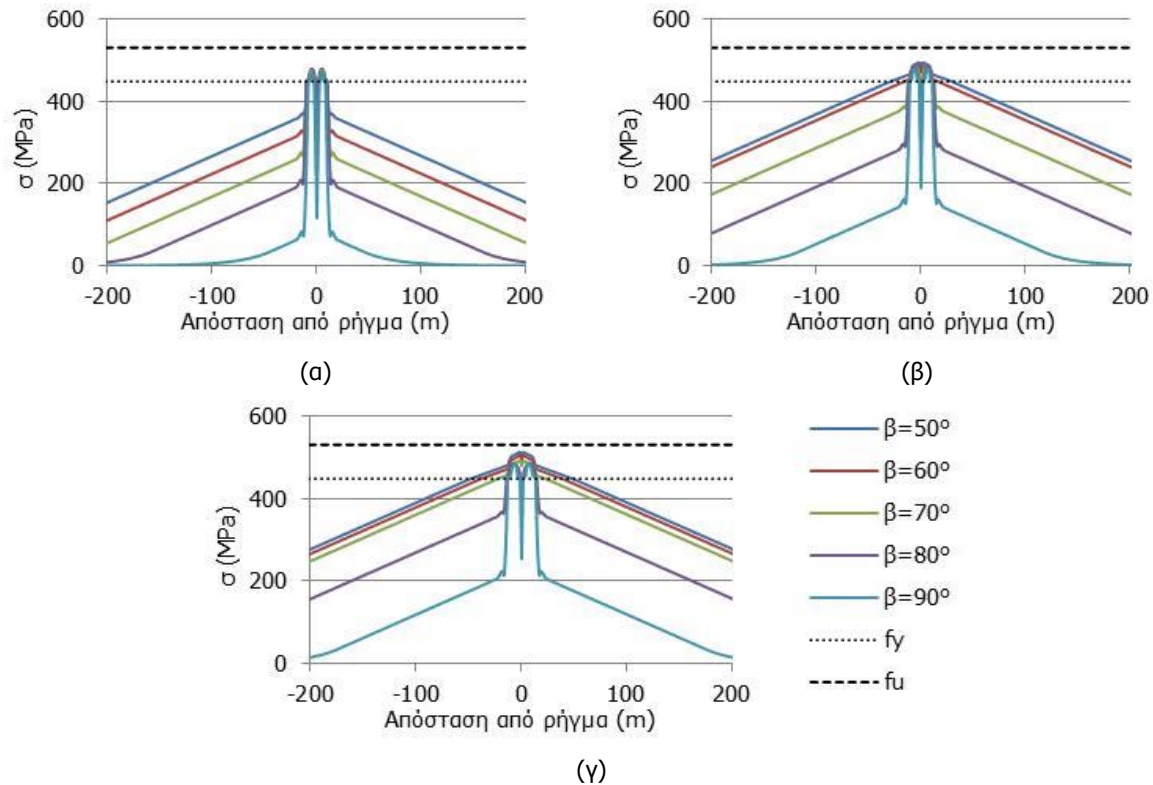


Σχήμα 2-14: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$



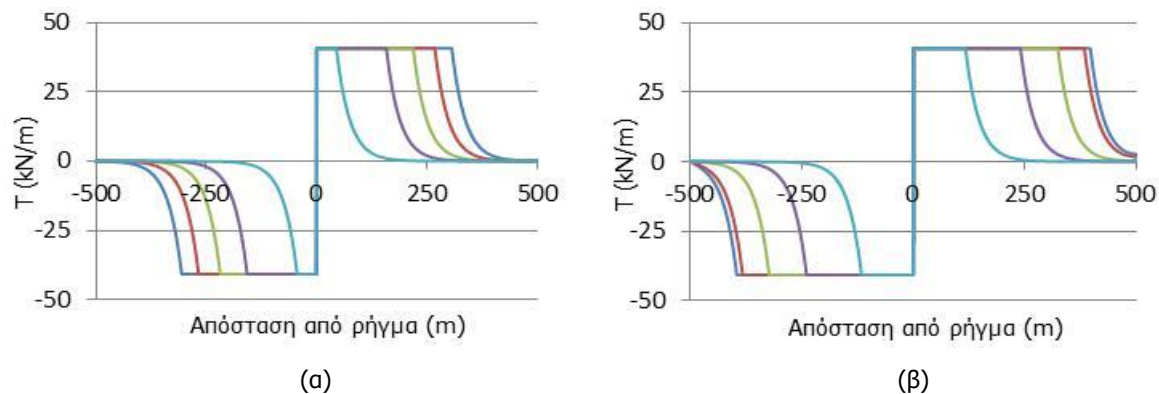
Σχήμα 2-15: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$

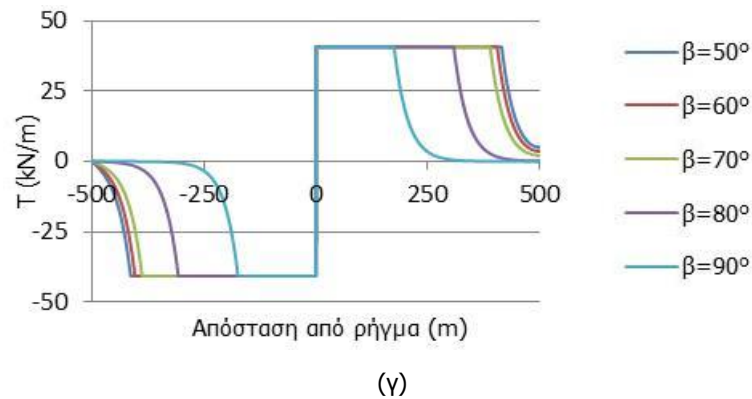
Οι τάσεις ( $\sigma$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού για διάφορες γωνίες διασταύρωσης  $\beta$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-16. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπερβαίνουν το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ) για όλες τις γωνίες διασταύρωσης  $\beta$  και είναι μεγαλύτερες όσο μειώνεται η τιμή της γωνίας διασταύρωσης  $\beta$ . Όταν αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετακίνηση, οι τάσεις στην περιοχή του ρήγματος προσεγγίζουν το όριο θραύσης του χάλυβα ( $f_u=531.00\text{MPa}$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-16(γ). Επίσης, δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση στις αναπτυσσόμενες τάσεις για μεγάλες τιμές της επιβαλλόμενης μετακινήσεως  $\Delta$  και μικρές γωνίες διασταύρωσης  $\beta$ .



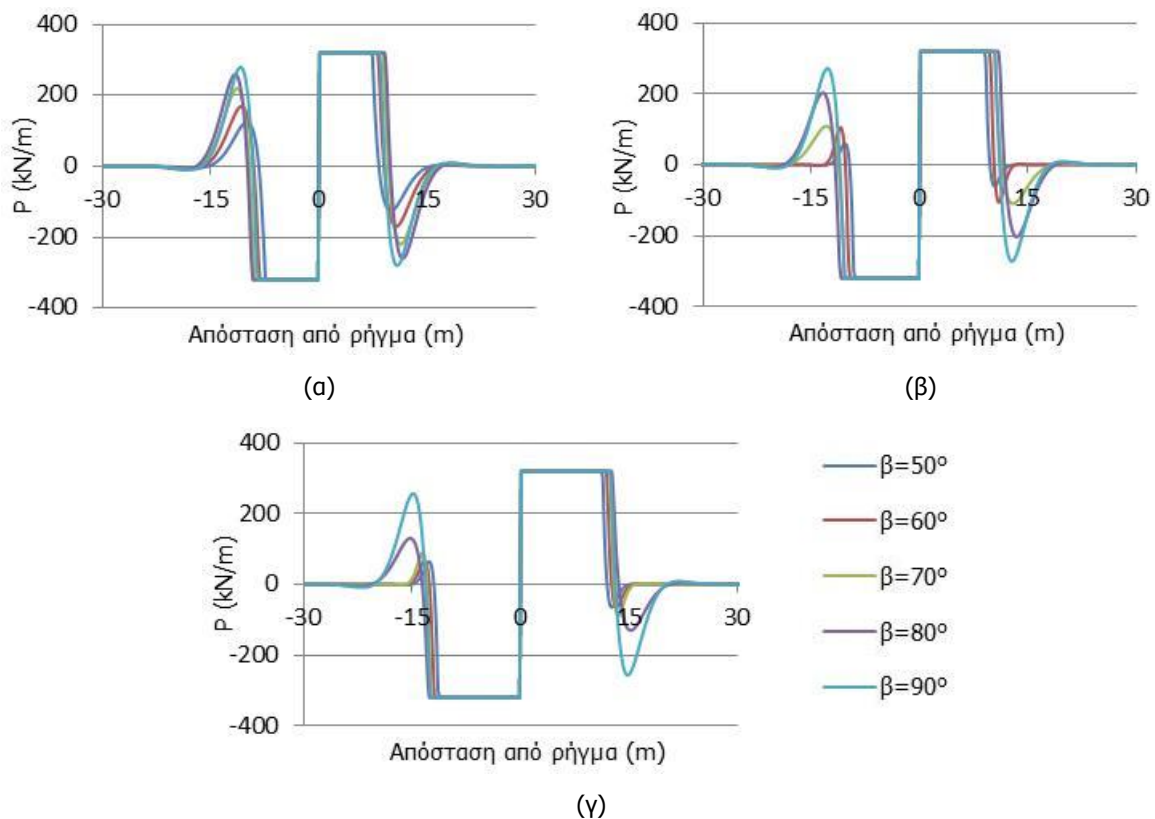
Σχήμα 2-16: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$

Στα Σχήματα 2-17 και 2-18 απεικονίζεται η κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (P), αντίστοιχα, κατά μήκος του αγωγού. Η μείωση της γωνίας  $\beta$  οδηγεί (Σχήμα 2-17) σε αξιοσημείωτη αύξηση του εύρους πλαστικοποίησης του εδάφους. Στις περιπτώσεις μάλιστα που η επιβαλλόμενη μετακίνηση έχει υψηλή τιμή, όλο σχεδόν το μήκος του εδάφους που προσομοιώθηκε έχει πλαστικοποιηθεί. Τέλος, από το Σχήμα 2-18 προκύπτει πως η γωνία διασταύρωσης  $\beta$  δεν επηρεάζει σημαντικά την αναπτυσσόμενη πλευρική εδαφική αντίσταση.





Σχήμα 2-17: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$



Σχήμα 2-18: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=3.0\text{m}$

## 2.4 ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

### 2.4.1 Κριτήρια χωροθέτησης εύκαμπτων κόμβων

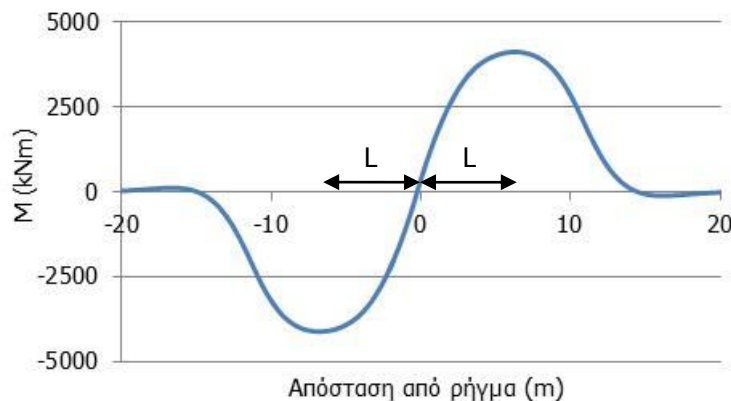
Τα αποτελέσματα της μελέτης του συνεχούς αγωγού αποτελούν τη βάση για την επιλογή των θέσεων τοποθέτησης των εύκαμπτων κόμβων. Η χρήση των εύκαμπτων κόμβων αποσκοπεί στη μείωση της αναπτυσσόμενης έντασης κατά μήκος του αγωγού και κυρίως στην ελάττωση των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων, όπως διεξοδικά παρουσιάζεται στην ενότητα 1.3. Αναζητείται ο βέλτιστος συνδυασμός τους ως προς το πλήθος και τις θέσεις στις οποίες τοποθετούνται, ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή απομείωση της αναπτυσσόμενης έντασης. Σε κάθε περίπτωση

μετράται η γωνία παραμόρφωσης του κόμβου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-19, έτσι ώστε να βρίσκεται εντός των προδιαγραφών του και να προσδιοριστούν τα απαιτούμενα μηχανικά χαρακτηριστικά του κόμβου κατά τη φάση σχεδιασμού.



Σχήμα 2-19: Απεικόνιση γωνίας στροφής εύκαμπτου κόμβου

Ως κριτήριο χωροθέτησης των εύκαμπτων κόμβων λαμβάνεται το εκάστοτε διάγραμμα καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό, για κάθε διαφορετικό συνδυασμό γωνίας διασταύρωσης ( $\beta$ ) και επιβαλλόμενης μετακίνησης ( $\Delta$ ). Αναζητούνται τα σημεία του συνεχούς αγωγού στα οποία οι καμπτικές ροπές εμφανίζουν μέγιστη τιμή, τα οποία θεωρείται ότι απέχουν απόσταση  $L$  από το ίχνος του ρήγματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-20. Με βάση τα συγκεκριμένα σημεία και την απόσταση  $L$  εξετάζονται, ως προς το πλήθος και τη θέση των εύκαμπτων κόμβων, οι περιπτώσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1. Στο εξής ο συνεχής αγωγός θα συμβολίζεται ως  $[cr]$ .



Σχήμα 2-20: Απόσταση  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος

Πίνακας 2-1: Περιπτώσεις ως προς το πλήθος και τη θέση των εύκαμπτων κόμβων

Περίπτωση	Πλήθος κόμβων	Θέσεις κόμβων ως προς το ίχνος του ρήγματος
$cp$	-	-
$2pfj$	2	$-L, +L$
$3pfj$	3	$-L, 0, +L$
$4pfj(1)$	4	$-L/2, -L, +L/2, +L$
$4pfj(2)$	4	$-2L, -L, +L, +2L$
$6pfj(1)$	6	$-3L/2, -L, -L/2, +L/2, +L, +3L/2$
$6pfj(2)$	6	$-2L, -L, -L/2, +L/2, +L, +2L$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μετακινήσεων, αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων, καμπτικών ροπών, εφελκυστικών και θλιπτικών διαμήκων παραμορφώσεων, τάσεων και αξονικών και εγκάρσιων ελατηρίων για ορισμένες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις ως προς τη γωνία διασταύρωσης  $\beta$  και την επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta$ . Σκοπός είναι η διερεύνηση της αποδοτικότητας των κόμβων και της ασκούμενης επιρροής στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη. Οι γωνίες

διασταύρωσης που παρουσιάζονται είναι οι  $\beta=50^\circ$ ,  $\beta=70^\circ$  και  $\beta=90^\circ$ , ενώ οι τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης είναι  $\Delta=0.5\text{m}$ ,  $\Delta=2.0\text{m}$  και  $\Delta=4.0\text{m}$ .

## 2.4.2 Αποτελέσματα διερεύνησης

### 2.4.2.1 Γωνία διασταύρωσης $\beta=90^\circ$

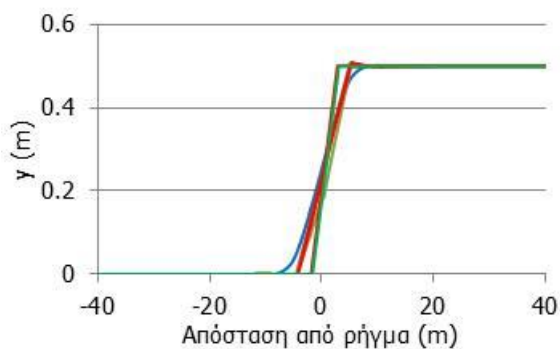
Στα Σχήματα 2-21 έως 2-29 παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό και στους αγωγούς με κόμβους για τρεις διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$ . Η απόσταση  $L$ , η οποία είναι η απόσταση του ρήγματος από τα σημεία στα οποία παρουσιάζει μέγιστο το διάγραμμα καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού (Σχήμα 2-20), στις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται ισούται με: (α) 4.75m, (β) 6.50m και (γ) 10.25m, αντίστοιχα. Οι 6 περιπτώσεις των αγωγών με κόμβους που εξετάζονται προκύπτουν κάθε φορά από την απόσταση  $L$ , σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1.

Ο κόμβος που υφίσταται τη μεγαλύτερη στροφή, για κάθε περίπτωση που μελετάται, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-2 έτσι ώστε να είναι γνωστές οι απαιτούμενες προδιαγραφές του. Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις 4ρfj(2), 6ρfj(1) και 6ρfj(2) οι εξωτερικοί κόμβοι, οι οποίοι βρίσκονται στις θέσεις  $2L$ ,  $3L/2$  και  $2L$  αντίστοιχα, έχουν σχεδόν μηδενική στροφή. Επιπλέον, παρατηρείται ότι ο κόμβος που βρίσκεται στη θέση  $L/2$  στις περιπτώσεις 4ρfj(1), 6ρfj(1) και 6ρfj(2) παρουσιάζει την ίδια στροφή, ενώ ο κόμβος που βρίσκεται στη θέση  $L$  στις περιπτώσεις 2ρfj και 4ρfj(2) παρουσιάζει την ίδια στροφή.

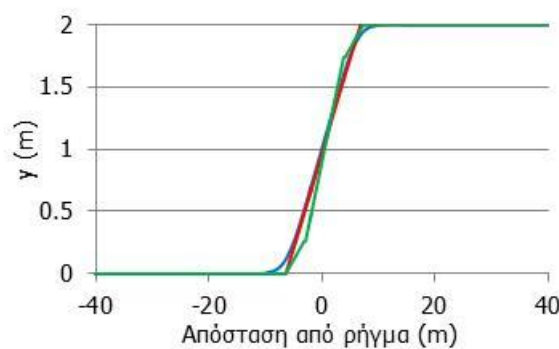
Πίνακας 2-2: Μέγιστη στροφή εύκαμπτου κόμβου ( $^\circ$ )

Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2ρfj	3.10	8.39	9.07
3ρfj	3.60	8.24	9.02
4ρfj(1)	6.05	8.10	7.90
4ρfj(2)	3.10	8.39	9.07
6ρfj(1)	6.05	8.10	7.90
6ρfj(2)	6.05	8.10	7.90

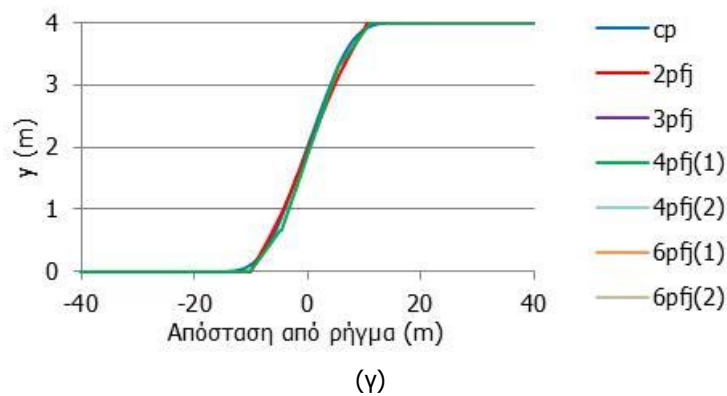
Η μετακίνηση (γ) του αγωγού κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-21. Η μετακίνηση του αγωγού ταυτίζεται οριακά για τις περιπτώσεις 4ρfj(1), 6ρfj(1) και 6ρfj(2), όπως επίσης και για τις περιπτώσεις 2ρfj, 3ρfj και 4ρfj(2). Παρατηρείται ότι η παραμόρφωση του αγωγού στις περιπτώσεις με εύκαμπτους κόμβους, σε σύγκριση με το συνεχή αγωγό, προσομοιάζει μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τμημάτων, λόγω της λειτουργίας του κόμβου ως εσωτερικής άρθρωσης στο συνεχές σύστημα. Στο Σχήμα 2-21 φαίνεται, υπό κλίμακα, και ο τρόπος με τον οποίο στρέφεται ο κάθε κόμβος.



(α)

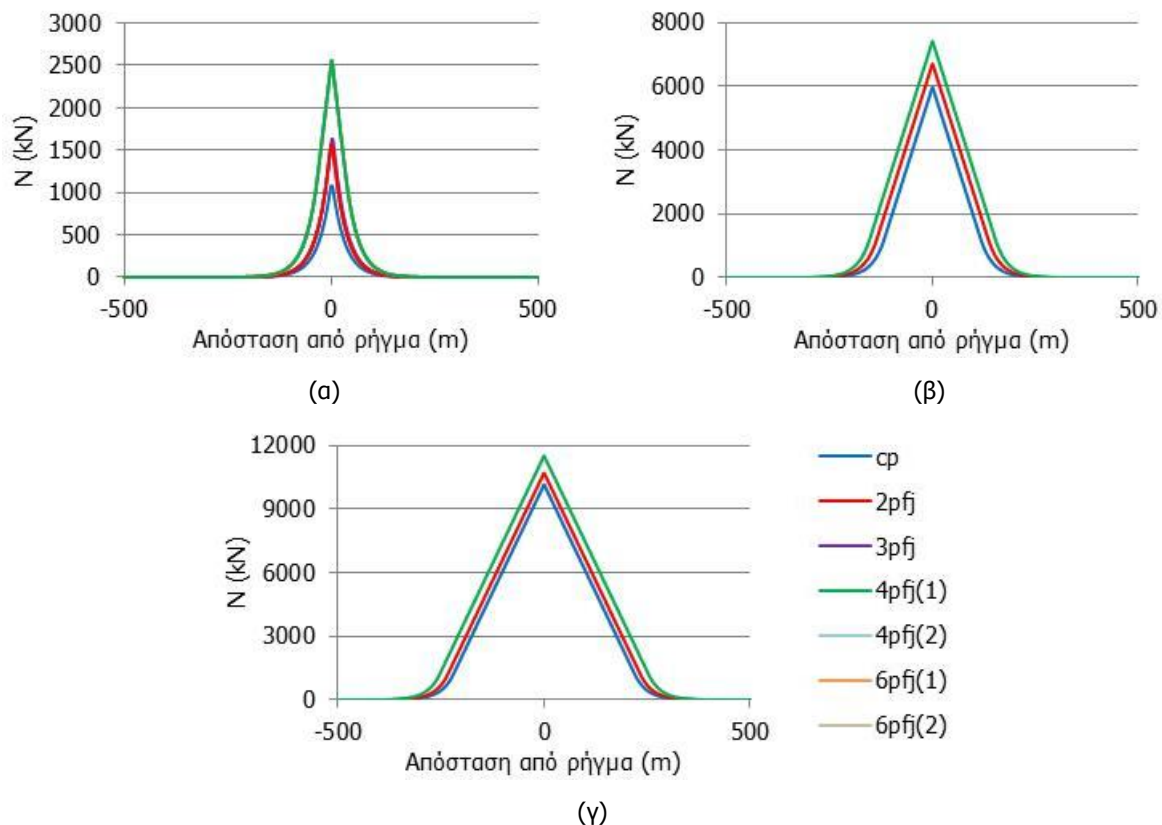


(β)



Σχήμα 2-21: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Οι αξονικές δυνάμεις (N) κατά μήκος του αγωγού αυξάνονται σε μικρό βαθμό με την προσθήκη των εύκαμπτων κόμβων συγκριτικά με το συνεχές αγωγό (Σχήμα 2-22), ενώ η μέγιστη τιμή τους εμφανίζεται στην περιοχή του ρήγματος, όπως αναμένεται. Η σύγκριση των τριών περιπτώσεων, (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$ , οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η σχετική αύξηση των αξονικών δυνάμεων είναι μικρότερη όσο αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$ . Σημειώνεται ότι η κατανομή των αξονικών δυνάμεων ταυτίζεται για τις περιπτώσεις 4pfj(1), 6pfj(1) και 6pfj(2), όπως επίσης και για τις περιπτώσεις 2pfj, 3pfj και 4pfj(2).

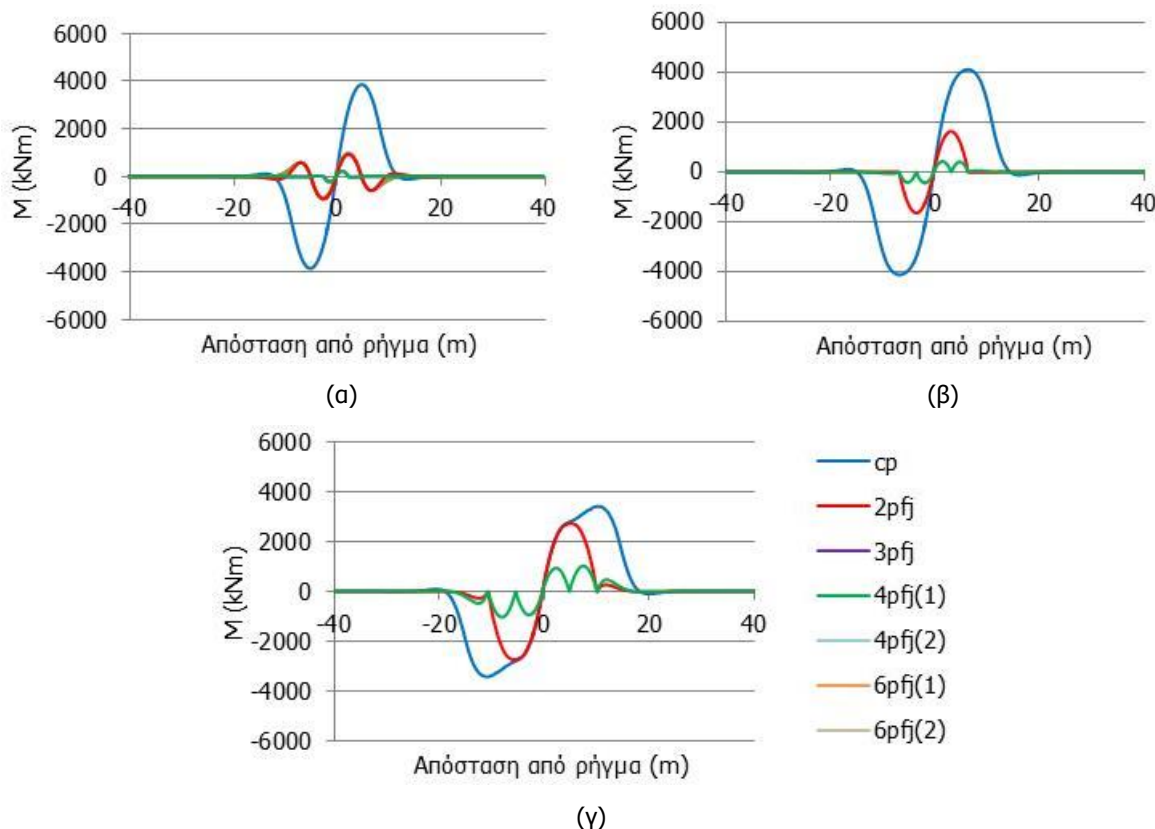


Σχήμα 2-22: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Η χρήση εύκαμπτων κόμβων λειτουργεί ευεργετικά στη μείωση των καμπτικών ροπών (M) που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού. Η κατανομή των καμπτικών ροπών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-23, ενώ το ποσοστό της μείωσής τους σε σχέση με το συνεχές αγωγό αποτυπώνεται στον Πίνακα



2-3, για κάθε περίπτωση ως προς τον αριθμό και τη θέση των κόμβων. Οι περιπτώσεις 4pfj(1), 6pfj(1) και 6pfj(2), για τις οποίες τα αποτελέσματα ταυτίζονται, οδηγούν σε μεγαλύτερη μείωση των καμπτικών ροπών συγκριτικά με τις περιπτώσεις 2pfj, 3pfj και 4pfj(2), ανεξάρτητα από την τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$ . Συμπεραίνεται, επομένως, ότι ο κόμβος που απέχουν απόσταση  $L/2$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο.

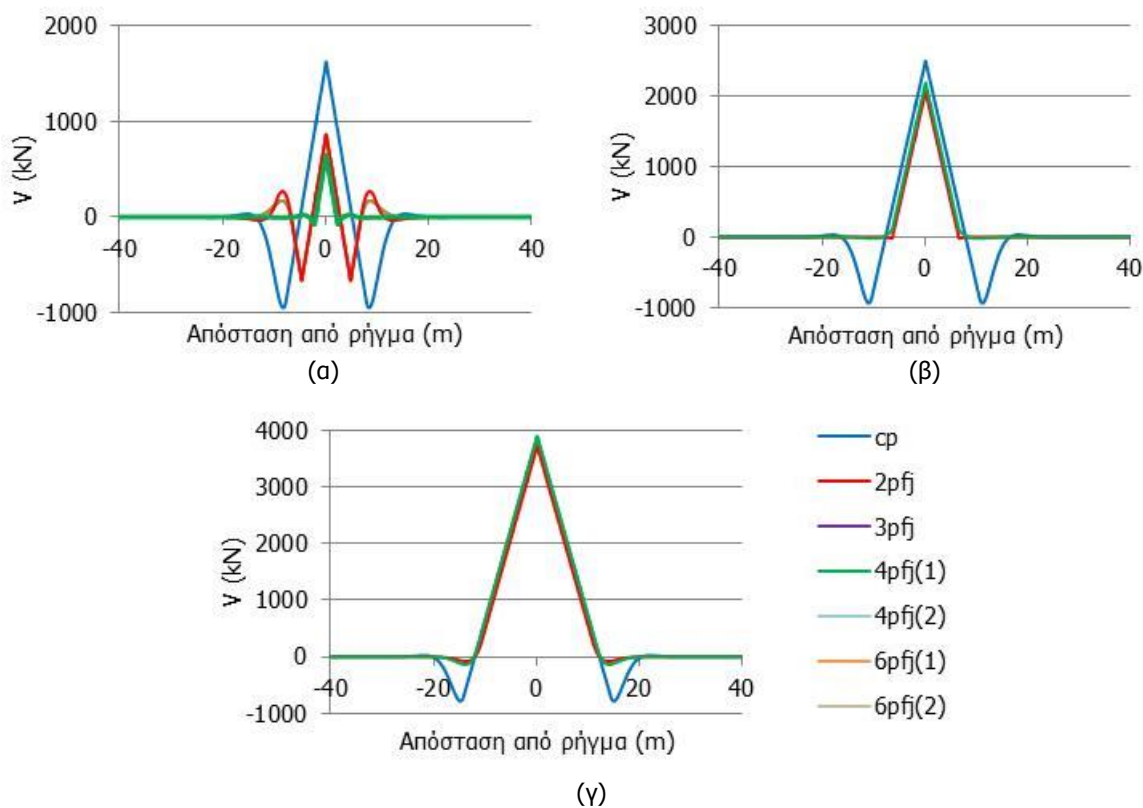


Σχήμα 2-23: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Πίνακας 2-3: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

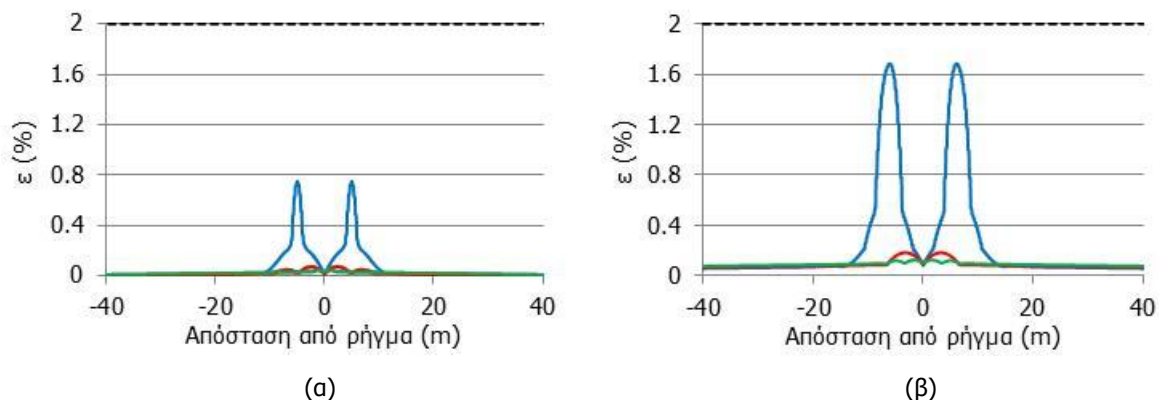
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	75.62	60.29	20.12
3pfj	74.38	59.86	19.66
4pfj(1)	94.26	89.64	69.92
4pfj(2)	75.62	60.29	20.12
6pfj(1)	94.26	89.64	69.92
6pfj(2)	94.26	89.64	69.92

Οι τέμνουσες δυνάμεις ( $V$ ) κατά μήκος του αγωγού μειώνονται με την προσθήκη των εύκαμπτων κόμβων, σύμφωνα με το Σχήμα 2-24. Διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη απόκλιση στην κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων για τις περιπτώσεις με κόμβους όταν αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$ , ενώ δεν παρατηρείται ουσιαστική μείωση για μεγάλες τιμές της μετακίνησης.

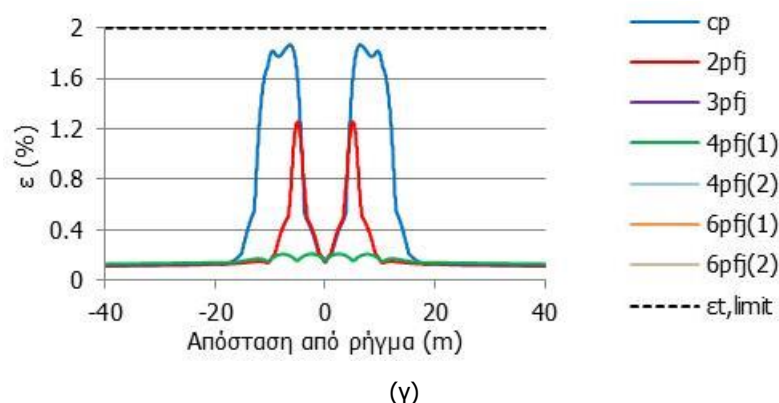


Σχήμα 2-24: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Από την κατανομή των εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\varepsilon$ ) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-25 προκύπτει ότι οι περιπτώσεις 4pfj(1), 6pfj(1) και 6pfj(2) οδηγούν στην ίδια ποσοστιαία μείωση συγκριτικά με το συνεχή αγωγό, η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-4. Την ίδια ποσοστιαία μείωση δίνουν και οι περιπτώσεις 2pfj, 3pfj και 4pfj(2) μεταξύ τους, αν και είναι μικρότερη σε σχέση με την προαναφερθείσα. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι οι περιπτώσεις 3pfj, 4pfj(2), 6pfj(1) και 6pfj(2) δεν προσφέρουν αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα και άρα η σύγκριση των αποτελεσμάτων μπορεί να περιοριστεί ανάμεσα στις περιπτώσεις 2pfj και 4pfj(1). Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις του συνεχούς αγωγού δεν υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\varepsilon_{t,limit}=2\%$ ) για καμία τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης, οπότε ο αγωγός δεν κινδυνεύει από εφελκυστική αστοχία. Παρ' όλα αυτά, η χρήση εύκαμπτων κόμβων λειτουργεί υπέρ της ασφαλείας και οδηγεί σε σημαντική μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Παρατηρείται, επίσης, ότι η αποτελεσματικότητα της χρήσης 2 κόμβων [2pfj] είναι μειωμένη για μεγάλες μετακινήσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-25(γ).





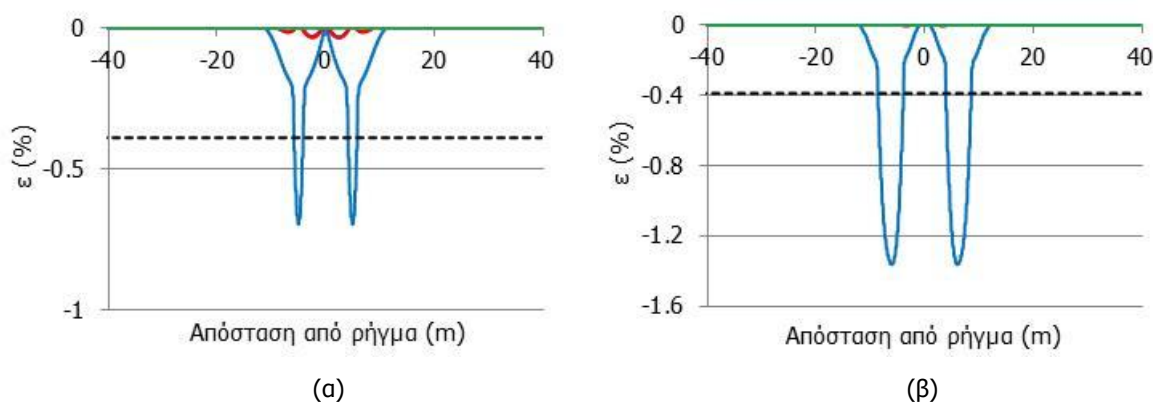


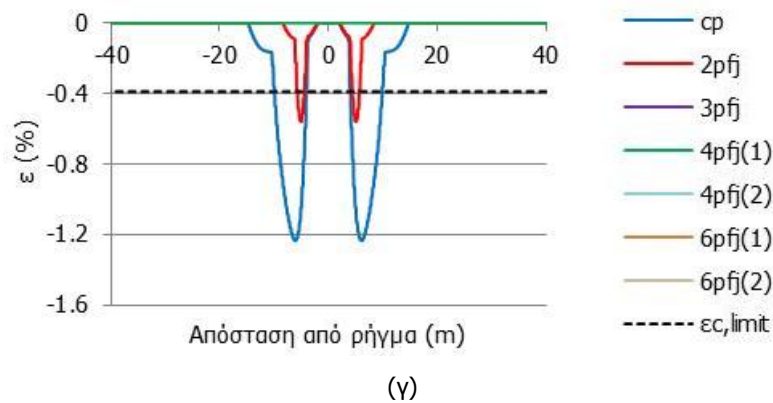
Σχήμα 2-25: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Πίνακας 2-4: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	90.06	89.13	32.69
3pfj	89.49	88.57	32.12
4pfj(1)	93.83	92.61	88.72
4pfj(2)	90.03	89.13	32.69
6pfj(1)	93.83	92.61	88.72
6pfj(2)	93.83	92.61	88.72

Οι θλιπτικές ανηγμένες διαμήκεις παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του συνεχούς αγωγού υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο έναντι τοπικού λυγισμού ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ) για όλες τις τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης. Από το Σχήμα 2-26 προκύπτει ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων μειώνει τις θλιπτικές παραμορφώσεις αρκετά κάτω από το κανονιστικό όριο και μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις, τις μηδενίζει οριακά. Ο Πίνακας 2-5 απεικονίζει το ποσοστό μείωσης των θλιπτικών παραμορφώσεων για κάθε περίπτωση και παρατηρείται πως στην περίπτωση μεγάλων μετακινήσεων η χρήση 2 κόμβων (2pfj) δεν έχει μεγάλη αποδοτικότητα και ο αγωγός κινδυνεύει να αστοχήσει από τοπικό λυγισμό.



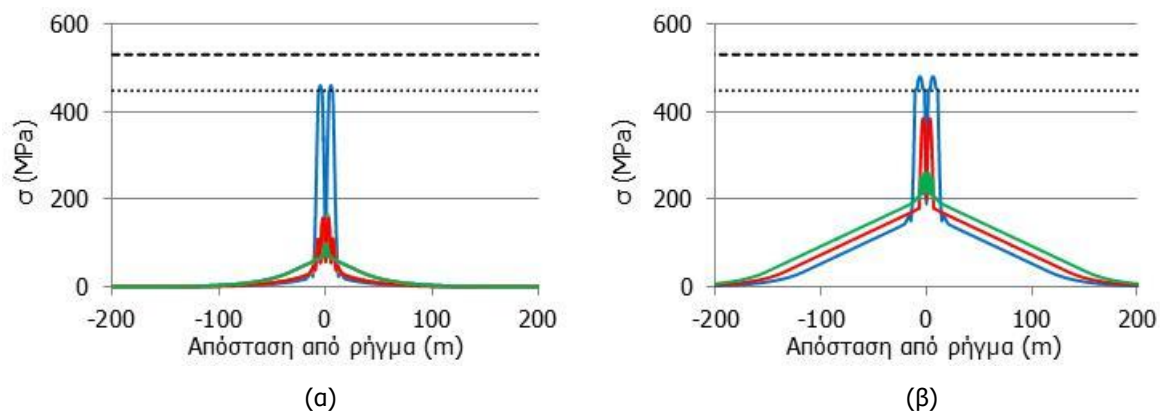


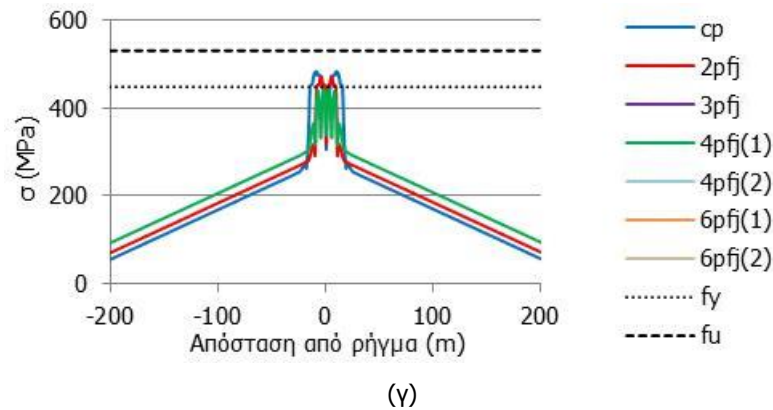
Σχήμα 2-26: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Πίνακας 2-5: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	95.04	99.51	54.73
3pfj	94.68	99.24	54.16
4pfj(1)	100.00	100.00	100.00
4pfj(2)	95.04	99.51	54.73
6pfj(1)	100.00	100.00	100.00
6pfj(2)	100.00	100.00	100.00

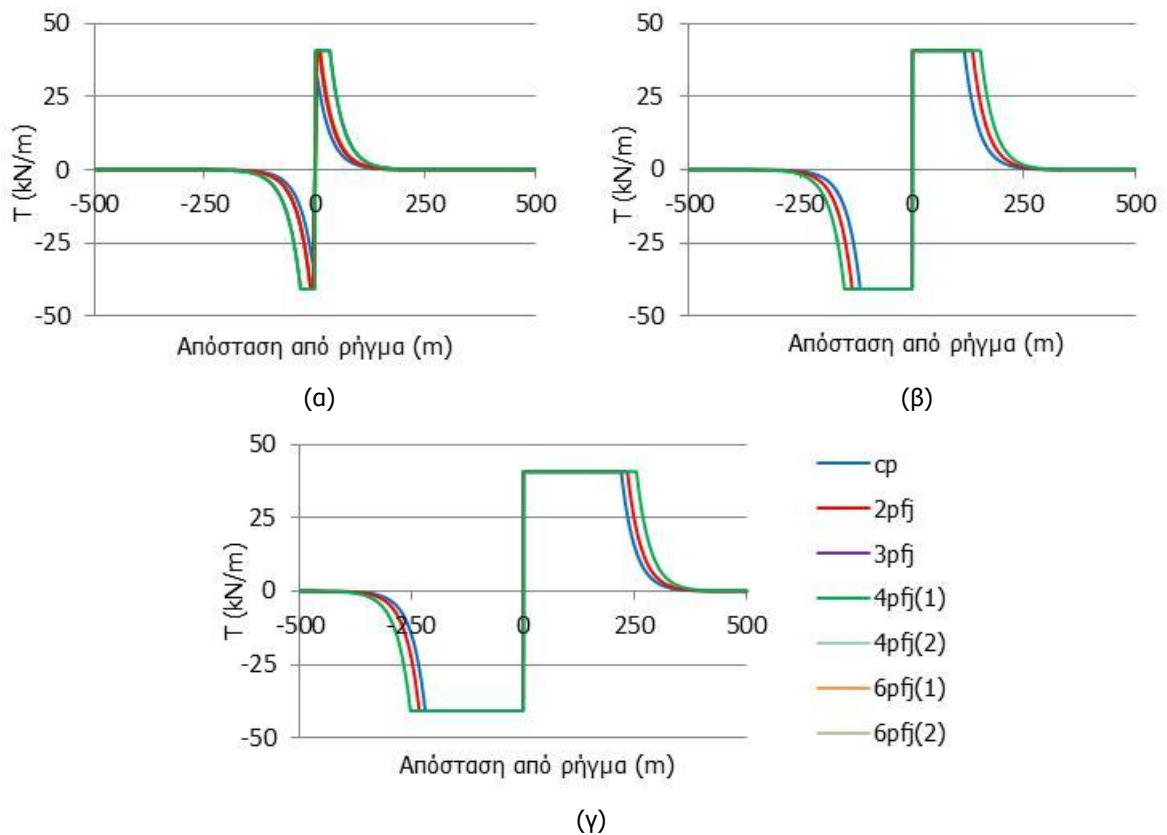
Στο Σχήμα 2-27 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού και διαπιστώνεται ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων οδηγεί, ιδιαίτερα για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$ , σε μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων αρκετά κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ). Αντίθετα, παρατηρείται ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι δε συμβάλλουν σε σημαντική μείωση των τάσεων όταν η τιμή της μετακίνησης ισούται με  $\Delta=4.0\text{m}$ , χωρίς ωστόσο να προκαλείται ανησυχία στο επίπεδο του αντισεισμικού σχεδιασμού, λόγω της μετελαστικής αντοχής του χάλυβα. Η χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)] αποδεικνύεται ότι απομειώνει περισσότερο τις αναπτυσσόμενες τάσεις σε σύγκριση με τη χρήση 2 κόμβων [2pfj].



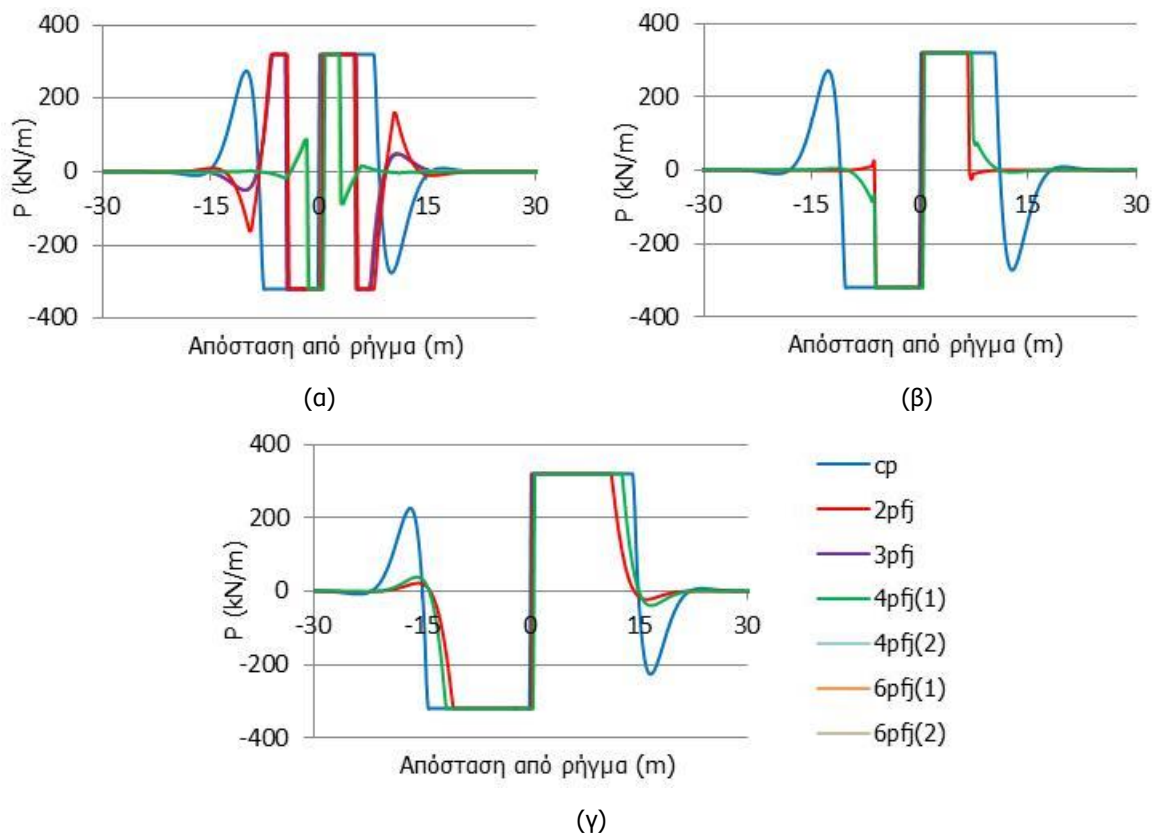


Σχήμα 2-27: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Από τα Σχήματα 2-28 και 2-29, στα οποία παρουσιάζεται η κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (P), αντίστοιχα, προκύπτει ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων δεν επηρεάζει σημαντικά το εύρος πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιοχή του ρήγματος. Οι εύκαμπτοι κόμβοι οδηγούν σε μείωση του αριθμού των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων που διαρρέουν και σε μικρή αύξηση των ελατηρίων τριβής που διαρρέουν. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι η αντίδραση του εδάφους είναι συνάρτηση της μετακίνησης του αγωγού μέσα στο όρυγμα. Η εισαγωγή των εύκαμπτων κόμβων μεταβάλλει το σχήμα του παραμορφωμένου αγωγού, αλλά δεν επηρεάζει σημαντικά το μέγεθος της μετακίνησής του, όπως προκύπτει και από το Σχήμα 2-21.



Σχήμα 2-28: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$



Σχήμα 2-29: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

#### 2.4.2.2 Γωνία διασταύρωσης $\beta=70^\circ$

Οι εύκαμπτοι κόμβοι λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις στον αγωγό και αποτελούν σημεία μηδενισμού του διαγράμματος των καμπτικών ροπών, επομένως είναι αποτελεσματικότεροι στις περιπτώσεις που η καμπτική ένταση κυριαρχεί στην απόκριση του αγωγού. Στην ενότητα 2.4.2.1 και για γωνία διασταύρωσης  $\beta=90^\circ$ , περίπτωση στην οποία κυριαρχεί η κάμψη, αποδεικνύεται ότι οι περιπτώσεις 3pfj, 4pfj(2), 6pfj(1) και 6pfj(2) δε συμβάλλουν στην περαιτέρω απομείωση των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων συγκριτικά με τις περιπτώσεις 2pfj και 4pfj(1), παρόλο που έχουν διαφορετική διάταξη και μεγαλύτερο αριθμό κόμβων. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση  $\beta=70^\circ$  που η καμπτική καταπόνηση μειώνεται συγκριτικά με την εφελκυστική, η μελέτη πραγματοποιείται για τις περιπτώσεις 2pfj και 4pfj(1) σε σύγκριση με τον αντίστοιχο συνεχή αγωγό [cp].

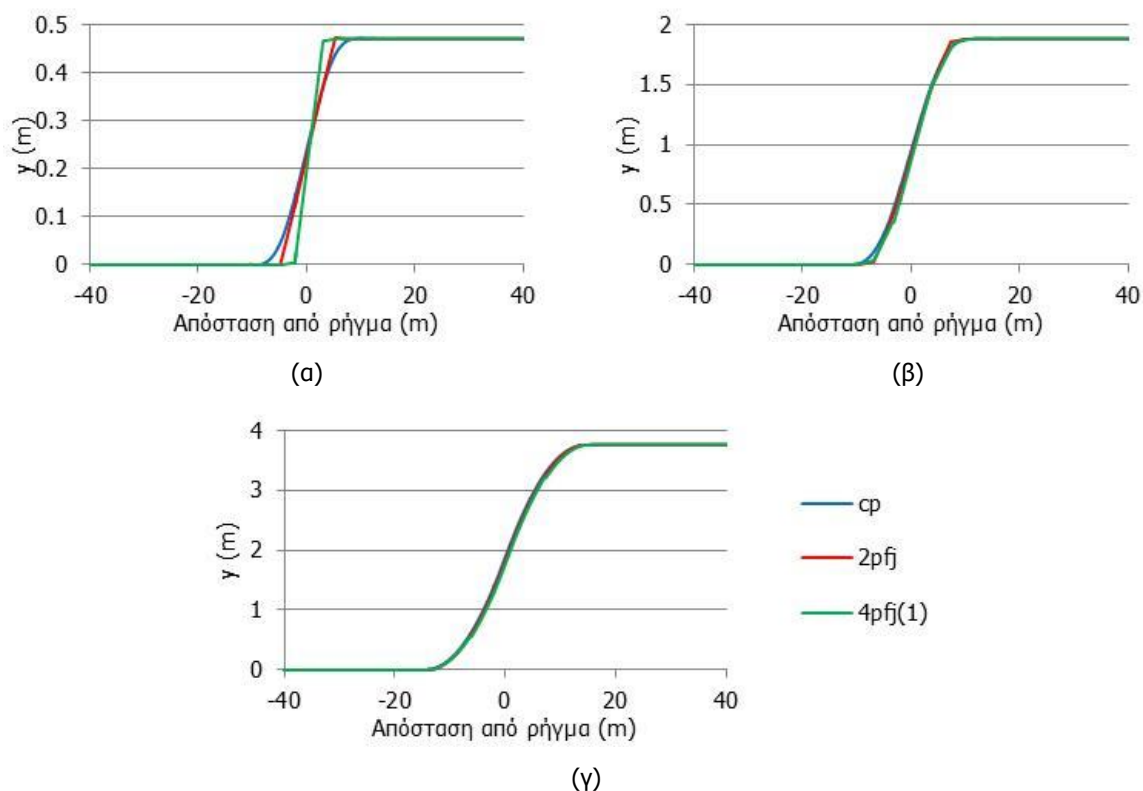
Στα Σχήματα 2-30 έως 2-38 παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό και στους αγωγούς με 2 κόμβους [2pfj] και 4 κόμβους [4pfj(1)] για τρεις διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$ . Η απόσταση L προκύπτει κάθε φορά από το διάγραμμα καμπτικών ροπών του συνεχούς αγωγού (Σχήμα 2-20) και για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται ισούται με: (α) 5m, (β) 7m και (γ) 13m. Η διάταξη των κόμβων για τις περιπτώσεις 2pfj και 4pfj(1) παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-1.

Ο κόμβος που υφίσταται τη μεγαλύτερη στροφή, για κάθε περίπτωση που μελετάται, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-6 έτσι ώστε να είναι γνωστές οι απαιτούμενες προδιαγραφές του. Η μεγαλύτερη στροφή κόμβου στις εξεταζόμενες περιπτώσεις παρατηρείται για χρήση 2 κόμβων [2pfj], μετακίνηση  $\Delta=2\text{m}$  και έχει τιμή  $5.25^\circ$ .

Πίνακας 2-6: Μέγιστη στροφή εύκαμπτου κόμβου (°)

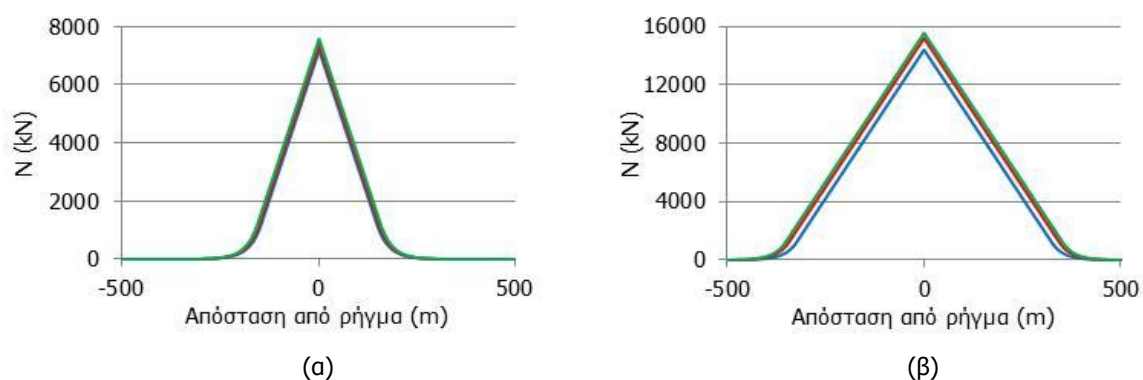
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	2.59	5.25	1.68
4pfj(1)	4.91	4.31	1.79

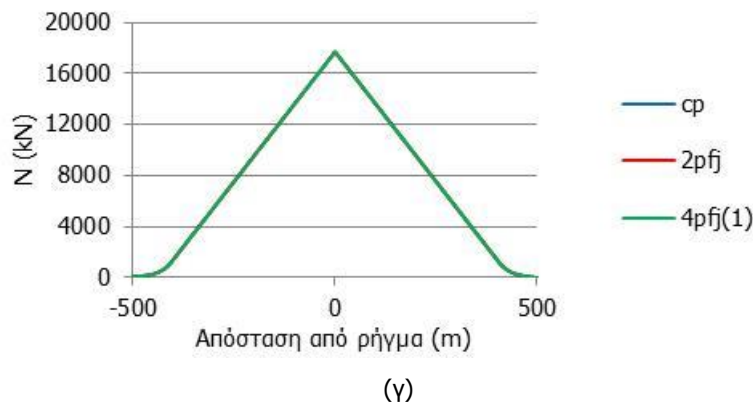
Στις περιπτώσεις με εύκαμπτους κόμβους η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος προσομοιάζει μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τεθλασμένων γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-30. Εξαιρεση αποτελεί η παραμόρφωση των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους όταν η επιβαλλόμενη μετακίνηση ισούται με  $\Delta=4.0\text{m}$ , οπότε και ταυτίζεται σχεδόν με την παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού.



Σχήμα 2-30: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

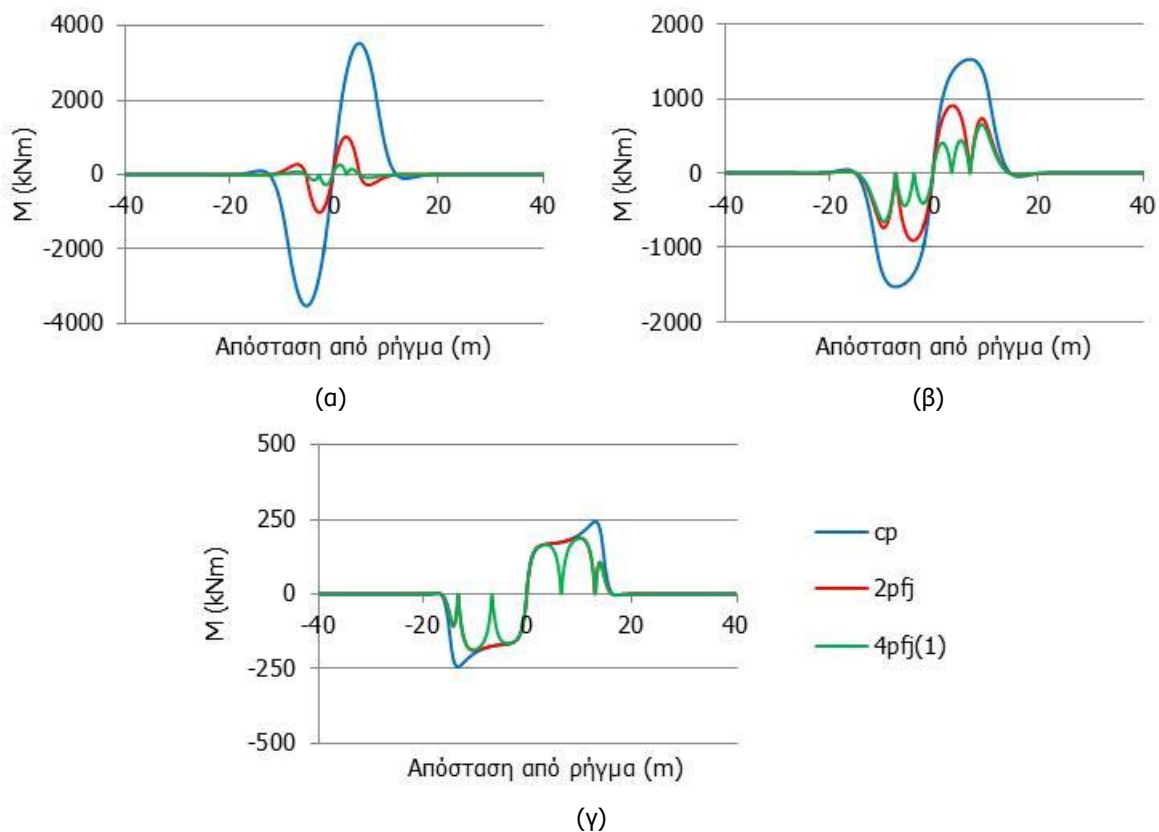
Η χρήση εύκαμπτων κόμβων, σύμφωνα με το Σχήμα 2-31, δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων ( $N$ ) κατά μήκος του αγωγού, οι οποίες παρουσιάζουν μέγιστο στο ίχνος του ρήγματος και ελαττώνονται προοδευτικά μακριά από αυτό λόγω της αναπτυσσόμενης τριβής στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους.





Σχήμα 2-31: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Στο Σχήμα 2-32 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών ( $M$ ), ενώ στον Πίνακα 2-7 η ποσοστιαία μείωσή τους για τις δύο περιπτώσεις με εύκαμπτους κόμβους. Η χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)] οδηγεί σε σημαντικότερη απομείωση των καμπτικών ροπών σε σύγκριση με τη χρήση 2 κόμβων [2pfj] σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Παρατηρείται, επίσης, ότι η αποδοτικότητα των κόμβων μειώνεται με την αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης, και κυρίως όταν η μετακίνηση ισούται με  $\Delta=4.0\text{m}$  οπότε και ο συνεχής αγωγός αναπτύσσει εξαρχής μικρές τιμές καμπτικών ροπών.



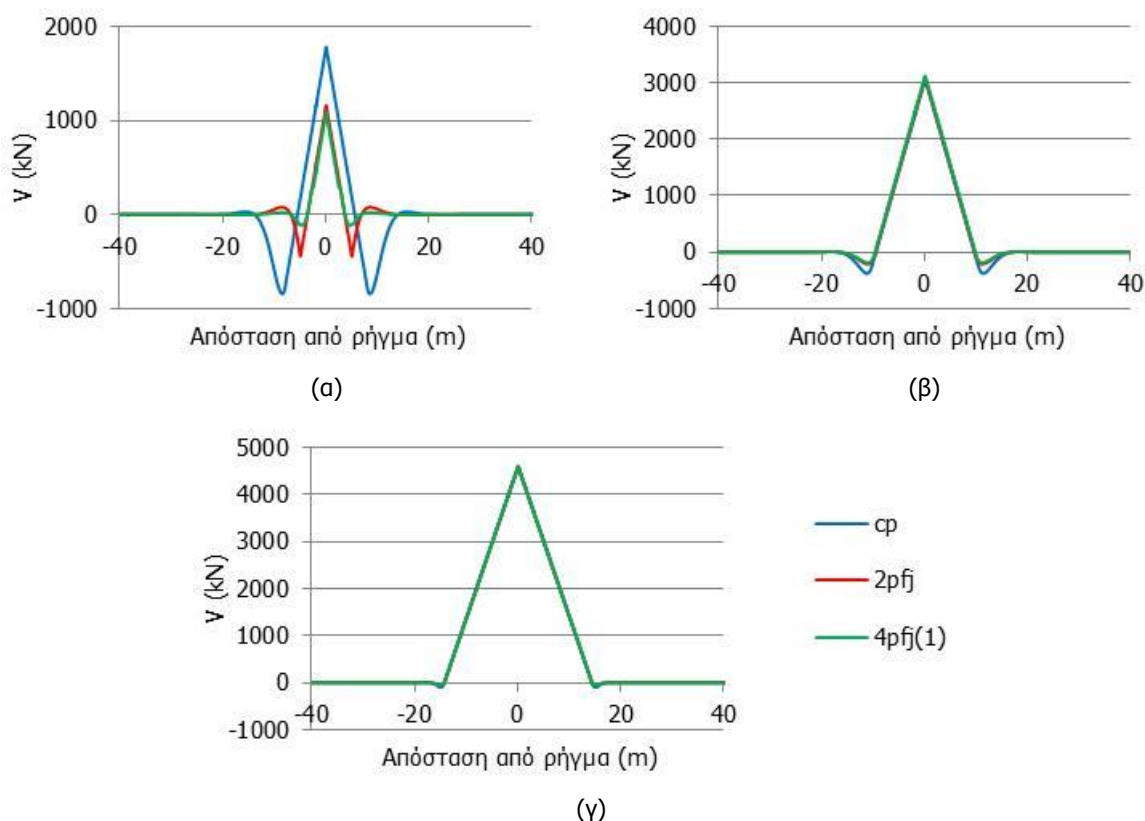
Σχήμα 2-32: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$



Πίνακας 2-7: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

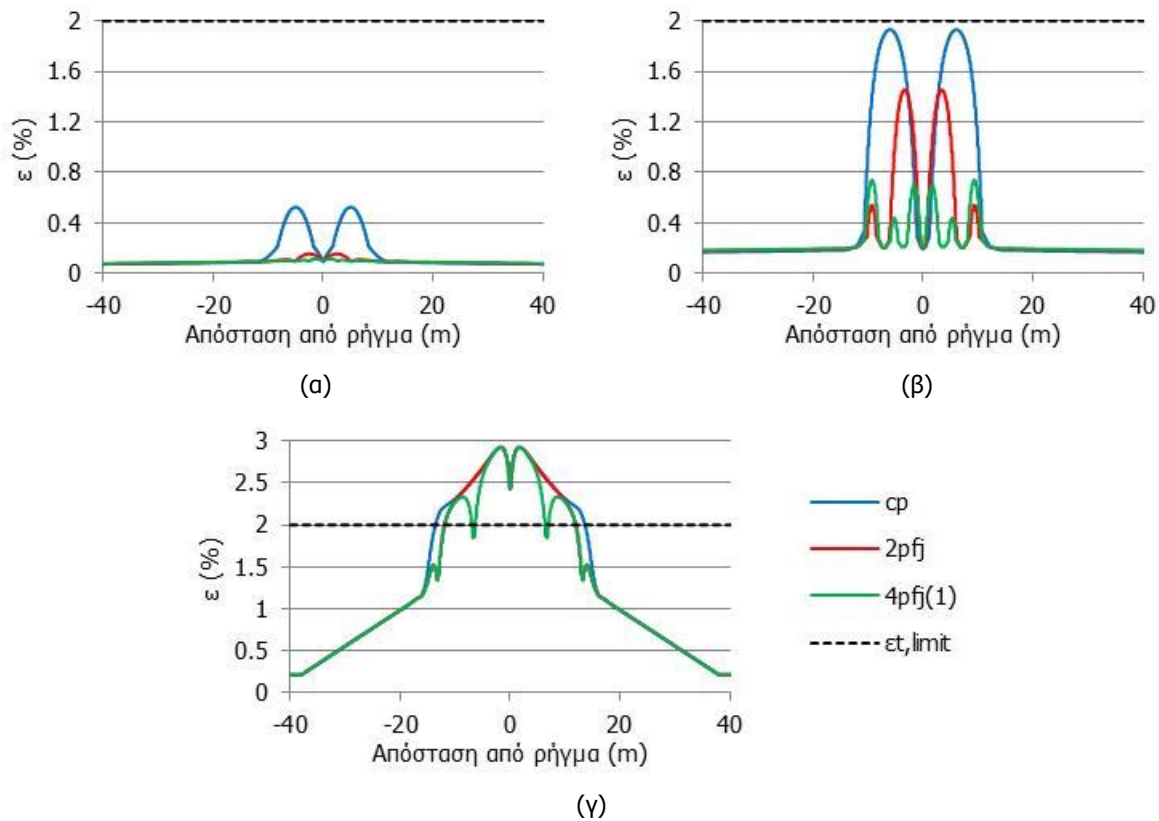
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	71.18	40.79	22.58
4pfj(1)	92.35	57.21	23.27

Στην περίπτωση της υπό μελέτη γωνίας ρήγματος η χρήση κόμβων συμβάλλει στη μείωση των τεμνουσών δυνάμεων ( $V$ ) μόνο στην περίπτωση μικρής επιβαλλόμενης μετακίνησης, σύμφωνα με το Σχήμα 2-33. Η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων στους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους ταυτίζεται με την κατανομή στο συνεχή αγωγό για τις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 2-33: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Από το Σχήμα 2-34 και τον Πίνακα 2-8 προκύπτει ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι οδηγούν σε σημαντική μείωση των εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) στις περιπτώσεις που η επιβαλλόμενη μετακίνηση έχει τιμές  $\Delta=0.5\text{m}$  και  $\Delta=2.0\text{m}$ . Η χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)] αποδεικνύεται περισσότερο αποδοτική συγκριτικά με τη χρήση 2 κόμβων [2pfj] και οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσοστιαία ελάττωση. Ωστόσο, στην περίπτωση  $\Delta=4.0\text{m}$  στην οποία υπερβαίνεται το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ) με κίνδυνο θραύσης των συγκολλήσεων του συνεχούς αγωγού, η μείωση που προσφέρουν οι αγωγοί με κόμβους στις εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι μηδενική.

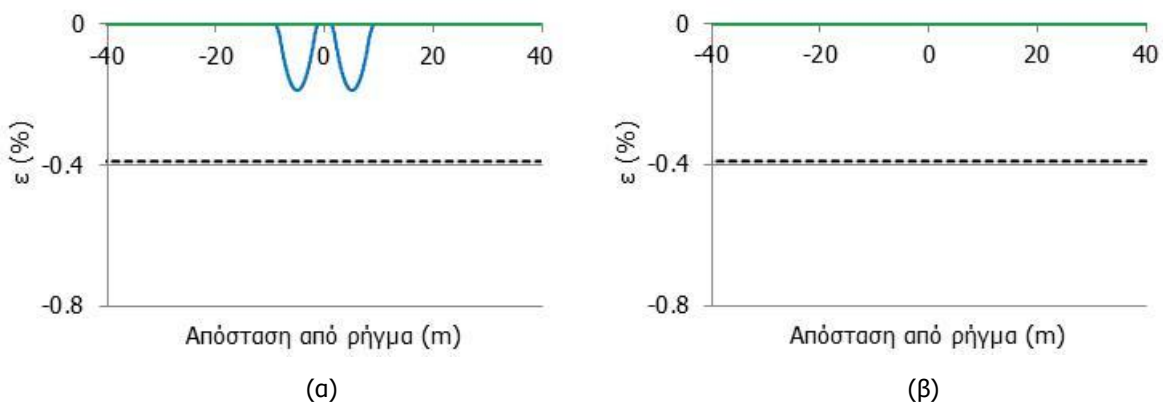


Σχήμα 2-34: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$ , (β)  $\Delta=2.0m$  και (γ)  $\Delta=4.0m$

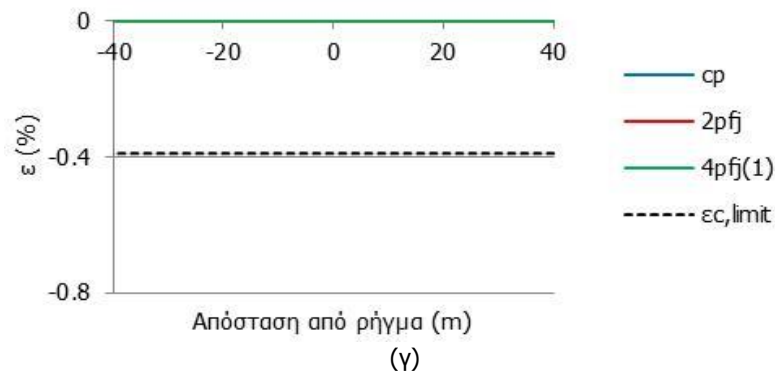
Πίνακας 2-8: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5m$	$\Delta=2.0m$	$\Delta=4.0m$
2pfj	70.51	24.75	0
4pfj(1)	78.07	61.71	0

Σε ό,τι αφορά στις θλιπτικές παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ), ο συνεχής αγωγός εμφανίζει σχεδόν μηδενικές τιμές στις εξεταζόμενες περιπτώσεις με εξαίρεση την περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=0.5m$ , σύμφωνα με το Σχήμα 2-35. Σε αυτή την περίπτωση, στην οποία οι θλιπτικές παραμορφώσεις του συνεχούς αγωγού δεν υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο έναντι τοπικού λυγισμού ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ), η χρήση εύκαμπτων κόμβων σχεδόν μηδενίζει τις θλιπτικές παραμορφώσεις (Πίνακας 2-9).





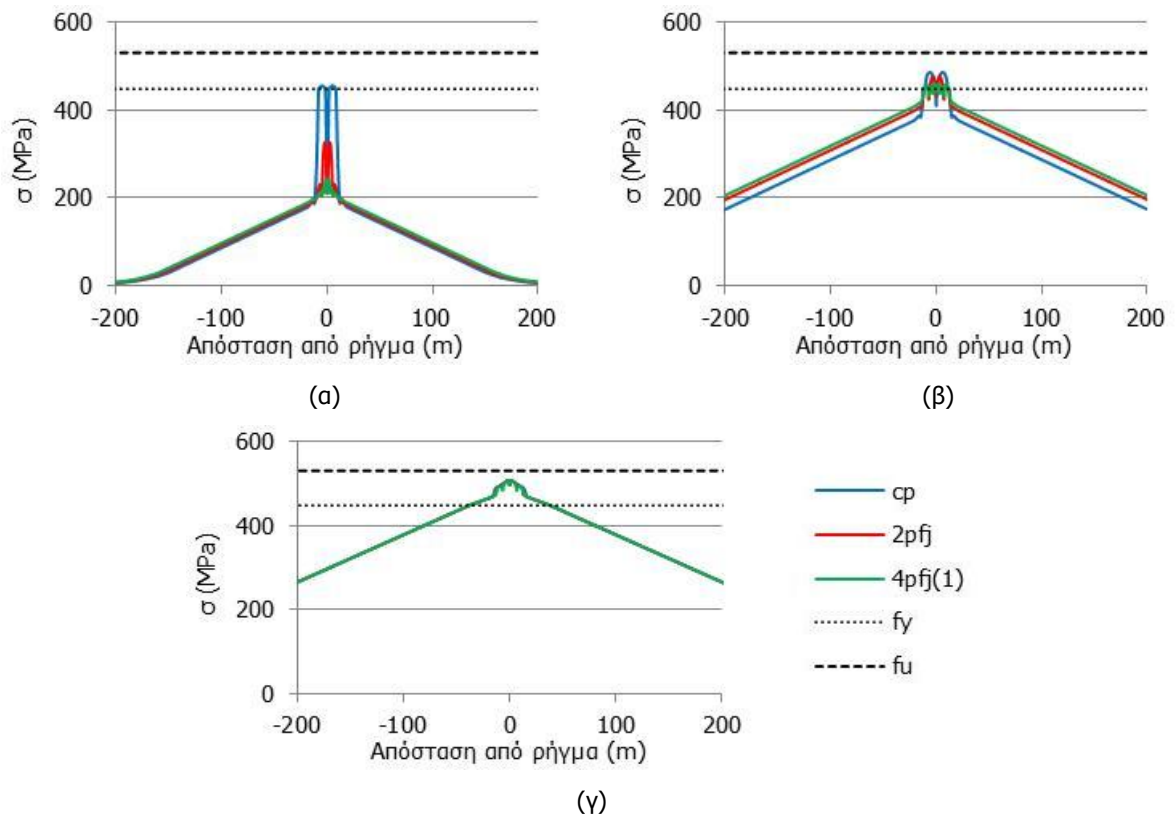


Σχήμα 2-35: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Πίνακας 2-9: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

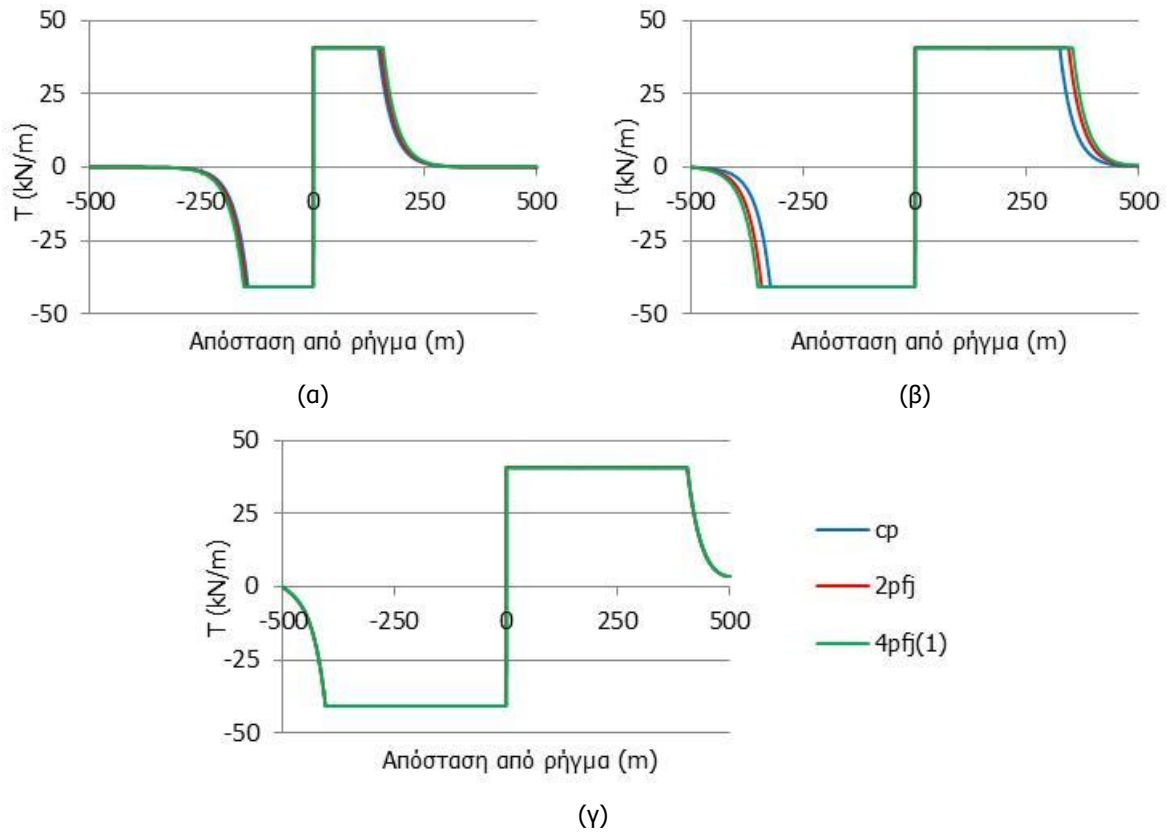
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	100.00	0	0
4pfj(1)	100.00	0	0

Στο Σχήμα 2-36 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος. Οι εύκαμπτοι κόμβοι, στην περίπτωση που η επιβαλλόμενη μετακίνηση είναι μικρή και ίση με  $\Delta=0.5\text{m}$ , συμβάλλουν στη μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων αρκετά κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ), και μάλιστα η περίπτωση 4pfj(1) αποδεικνύεται αποδοτικότερη. Στις υπόλοιπες όμως εξεταζόμενες περιπτώσεις η χρήση των κόμβων δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις τάσεις που αναπτύσσονται και στην περίπτωση  $\Delta=4.0\text{m}$  η κατανομή των τάσεων ταυτίζεται με την αντίστοιχη κατανομή του συνεχούς αγωγού.

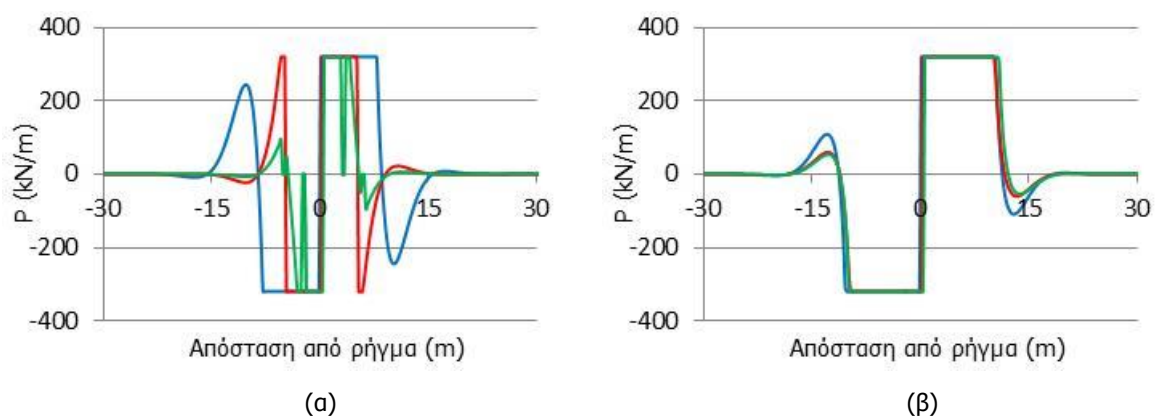


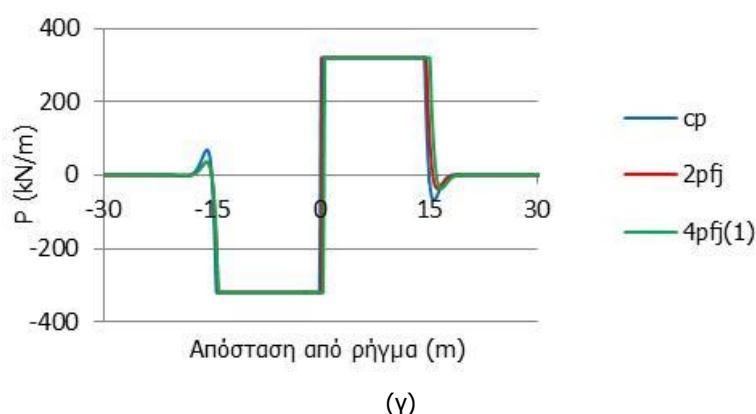
Σχήμα 2-36: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Το εύρος πλαστικοποίησης του εδάφους κατά μήκος του αγωγού δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη χρήση εύκαμπτων κόμβων, όπως φαίνεται από τις κατανομές των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (P) στα Σχήματα 2-37 και 2-38. Ο αριθμός των πλευρικών ελατηρίων που διαρρέουν μειώνεται με την προσθήκη των κόμβων μόνο στην περίπτωση που η επιβαλλόμενη μετακίνηση ισούται με  $\Delta=0.5m$ .



Σχήμα 2-37: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$ , (β)  $\Delta=2.0m$  και (γ)  $\Delta=4.0m$





Σχήμα 2-38: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

#### 2.4.2.3 Γωνία διασταύρωσης $\beta=50^\circ$

Οι εύκαμπτοι κόμβοι είναι αποτελεσματικότεροι στις περιπτώσεις που η κάμψη κυριαρχεί στην απόκριση του αγωγού, καθώς λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις και οι θέσεις τοποθέτησής τους αποτελούν σημεία μηδενισμού του διαγράμματος καμπτικών ροπών. Στην ενότητα 2.4.2.1 και για γωνία διασταύρωσης  $\beta=90^\circ$ , περίπτωση στην οποία κυριαρχεί η κάμψη, διαπιστώνεται ότι οι περιπτώσεις 3pfj, 4pfj(2), 6pfj(1) και 6pfj(2), αν και έχουν διαφορετική διάταξη και διαφορετικό αριθμό κόμβων, δε συμβάλλουν στην περαιτέρω απομείωση των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων συγκριτικά με τις περιπτώσεις 2pfj και 4pfj(1). Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση  $\beta=50^\circ$  που η κάμψη δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο όσο στις υπόλοιπες εξεταζόμενες γωνίες διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος, η μελέτη πραγματοποιείται για τις περιπτώσεις 2pfj και 4pfj(1) σε σύγκριση με τον αντίστοιχο συνεχή αγωγό [cp].

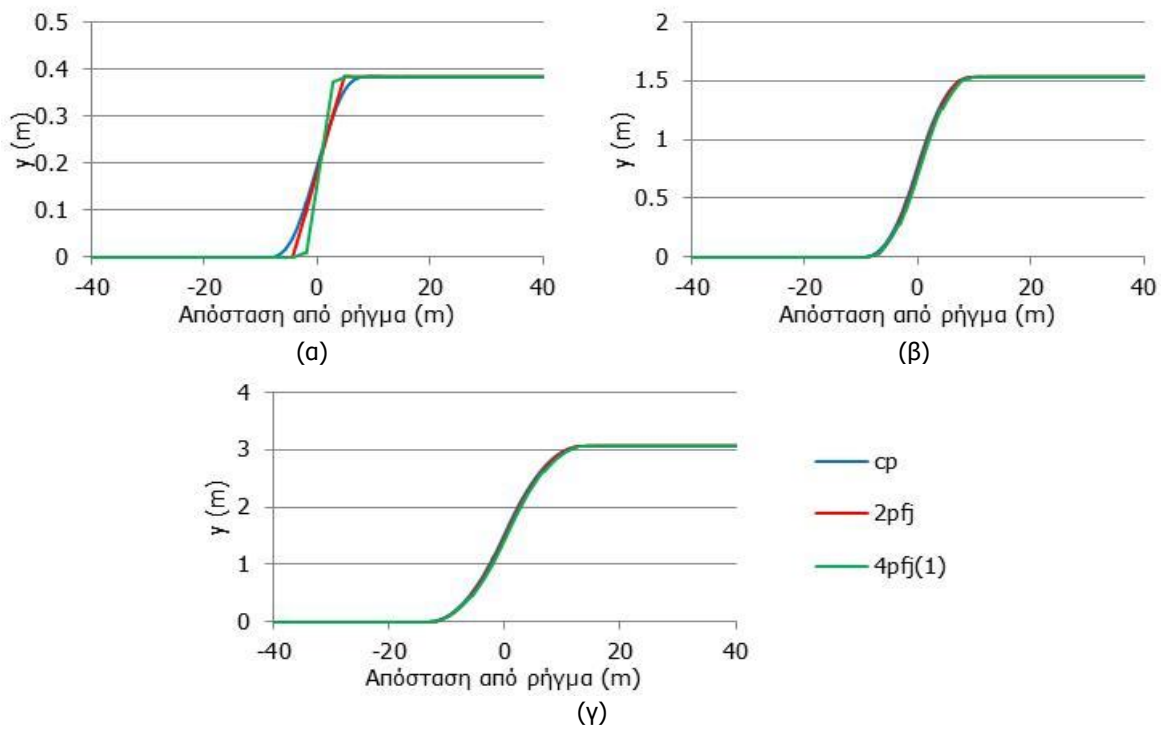
Τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό και στους αγωγούς με 2 κόμβους [2pfj] και 4 κόμβους [4pfj(1)] για τρεις διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$  παρουσιάζονται στα Σχήματα 2-39 έως 2-47. Η απόσταση L που προκύπτει κάθε φορά από το διάγραμμα καμπτικών ροπών του συνεχούς αγωγού (Σχήμα 2-20), για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται ισούται με: (α) 4.5m, (β) 7m και (γ) 12m. Η διάταξη των κόμβων για τις περιπτώσεις 2pfj και 4pfj(1) παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-1.

Ο κόμβος που υφίσταται τη μεγαλύτερη στρόφι, για κάθε περίπτωση που μελετάται, παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-10 έτσι ώστε να είναι γνωστές οι απαιτούμενες προδιαγραφές του. Η μεγαλύτερη στρόφι κόμβου στις εξεταζόμενες περιπτώσεις προκύπτει με χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)], μετακίνηση  $\Delta=0.5\text{m}$  και έχει τιμή  $4.11^\circ$ .

Πίνακας 2-10: Μέγιστη στρόφι εύκαμπτου κόμβου ( $^\circ$ )

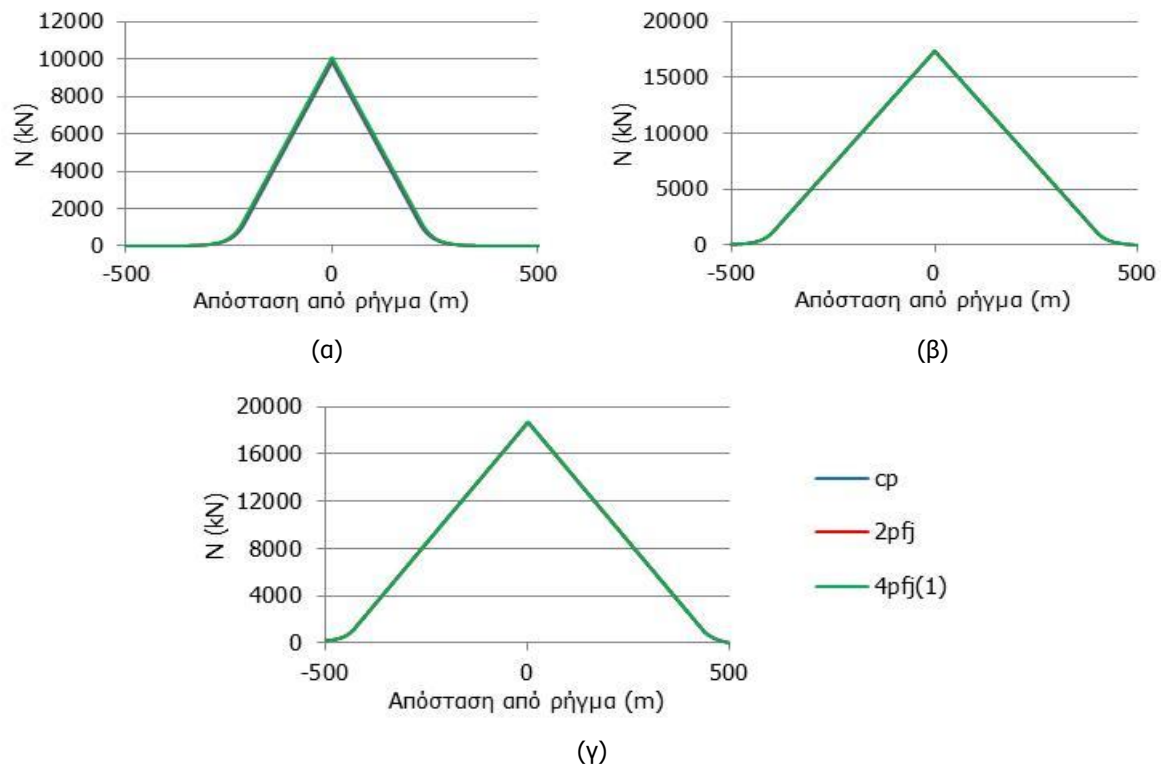
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	2.33	1.78	1.52
4pfj(1)	4.11	1.77	1.63

Η μετακίνηση (γ) των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους προσομοιάζει μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τεθλασμένων γραμμών στην περιοχή του ρήγματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-39(α), όπου η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης είναι  $\Delta=0.5\text{m}$ . Στις υπόλοιπες, όμως, περιπτώσεις που εξετάζονται η παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού ταυτίζεται με τις παραμορφώσεις των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους.



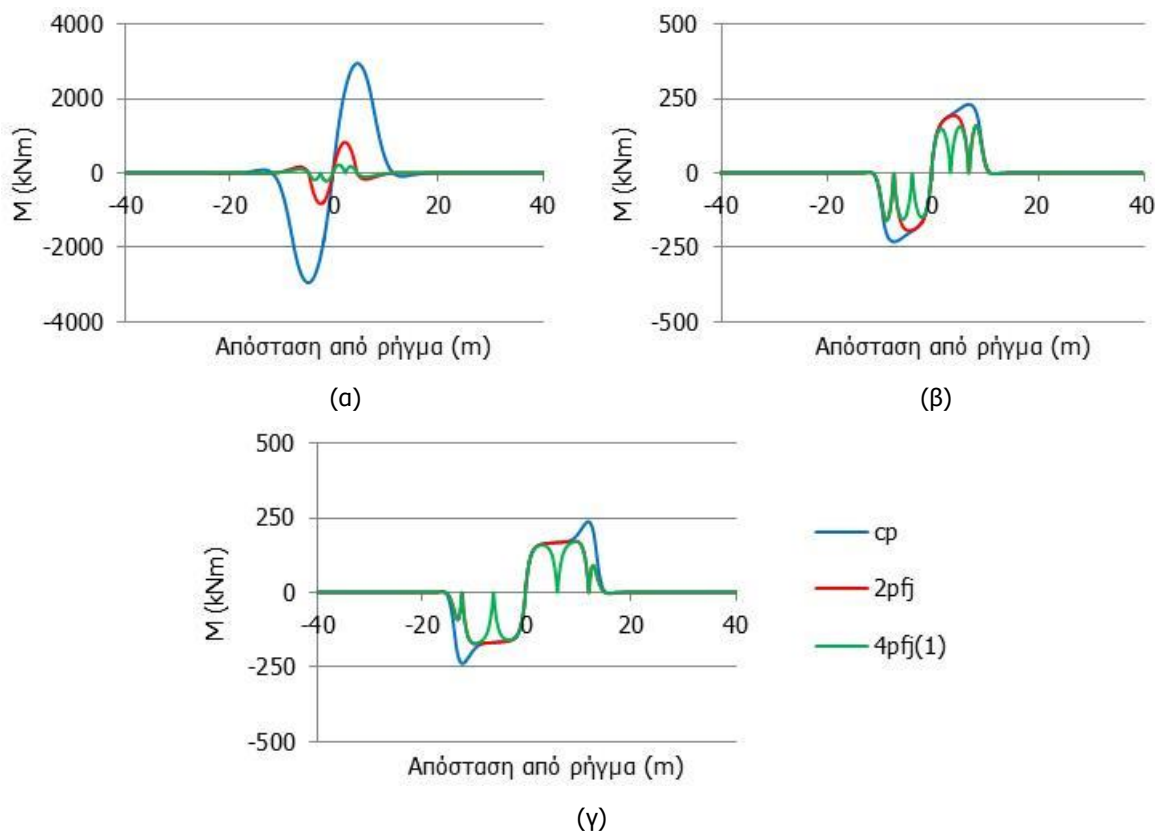
Σχήμα 2-39: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων (N) κατά μήκος του αγωγού, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-40, δεν επηρεάζεται από τη χρήση εύκαμπτων κόμβων σε καμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, λόγω της κυριαρχίας της αξονικής έντασης.



Σχήμα 2-40: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Στο Σχήμα 2-41 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών ( $M$ ), ενώ στον Πίνακα 2-11 το ποσοστό μείωσής τους για τις δύο περιπτώσεις με εύκαμπτους κόμβους. Η χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)] οδηγεί σε σημαντικότερη απομείωση των καμπτικών ροπών συγκριτικά με τη χρήση 2 κόμβων [2pfj] σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Επιπλέον, ο συνεχής αγωγός, όταν η μετακίνηση που επιβάλλεται είναι μεγαλύτερη από  $\Delta=2.0\text{m}$ , αναπτύσσει πολύ χαμηλές καμπτικές ροπές. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι εύκαμπτοι κόμβοι εμφανίζουν μειωμένη αποδοτικότητα και δεν προσφέρουν σημαντική ποσοστιαία απομείωση των καμπτικών ροπών.

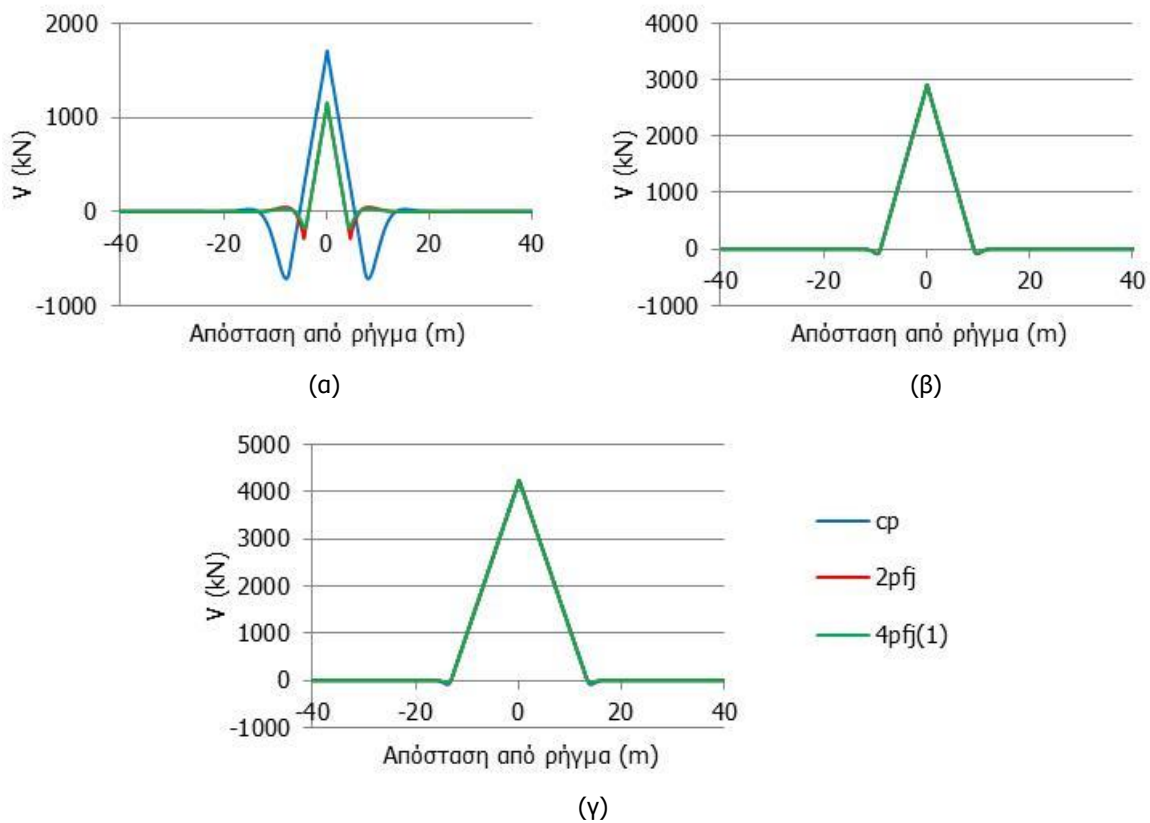


Σχήμα 2-41: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Πίνακας 2-11: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

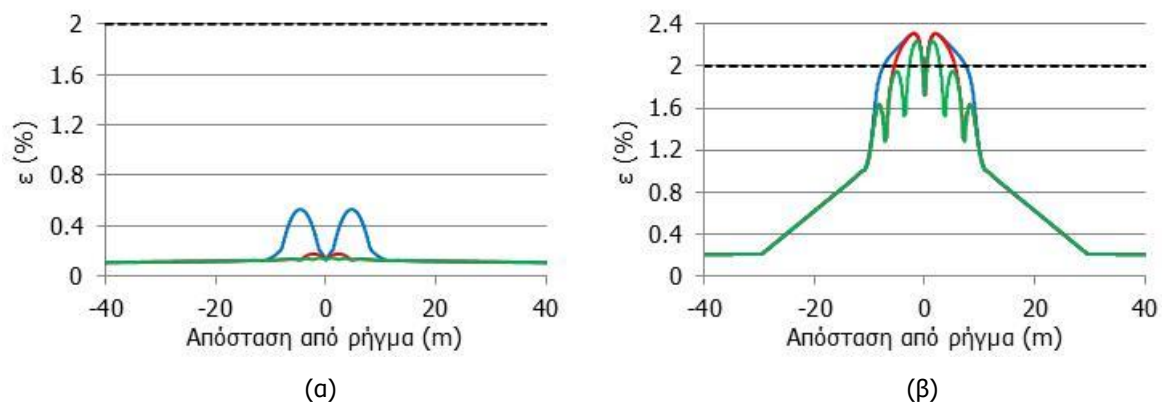
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	71.93	16.34	27.47
4pfj(1)	92.48	30.86	28.17

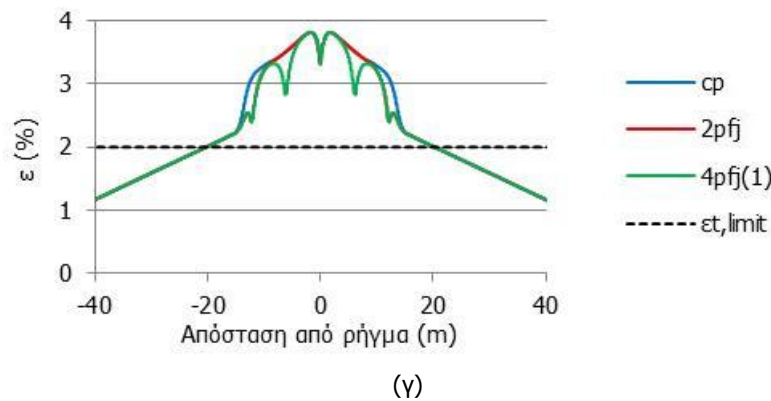
Στην περίπτωση της υπό μελέτη γωνίας ρήγματος η χρήση κόμβων συμβάλλει στη μείωση των τεμνουσών δυνάμεων ( $V$ ) μόνο στην περίπτωση μικρής επιβαλλόμενης μετακίνησης, σύμφωνα με το Σχήμα 2-42. Η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων στους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους ταυτίζεται με την κατανομή στο συνεχή αγωγό στις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 2-42: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Από το Σχήμα 2-43 και τον Πίνακα 2-12 προκύπτει ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι οδηγούν σε σημαντική μείωση των εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) στην περιπτώσεις που η επιβαλλόμενη μετακίνηση έχει τιμή  $\Delta=0.5\text{m}$ . Η χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)] αποδεικνύεται περισσότερο αποδοτική συγκριτικά με τη χρήση 2 κόμβων [2pfj] και οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσοστιαία ελάττωση. Ωστόσο, στις περιπτώσεις  $\Delta=2.0\text{m}$  και  $\Delta=4.0\text{m}$ , στις οποίες υπερβαίνεται το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ) και είναι έντονος ο κίνδυνος θραύσης των συγκολλήσεων του αγωγού, η μείωση που προσφέρουν οι αγωγοί με κόμβους στις εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι αμελητέα.



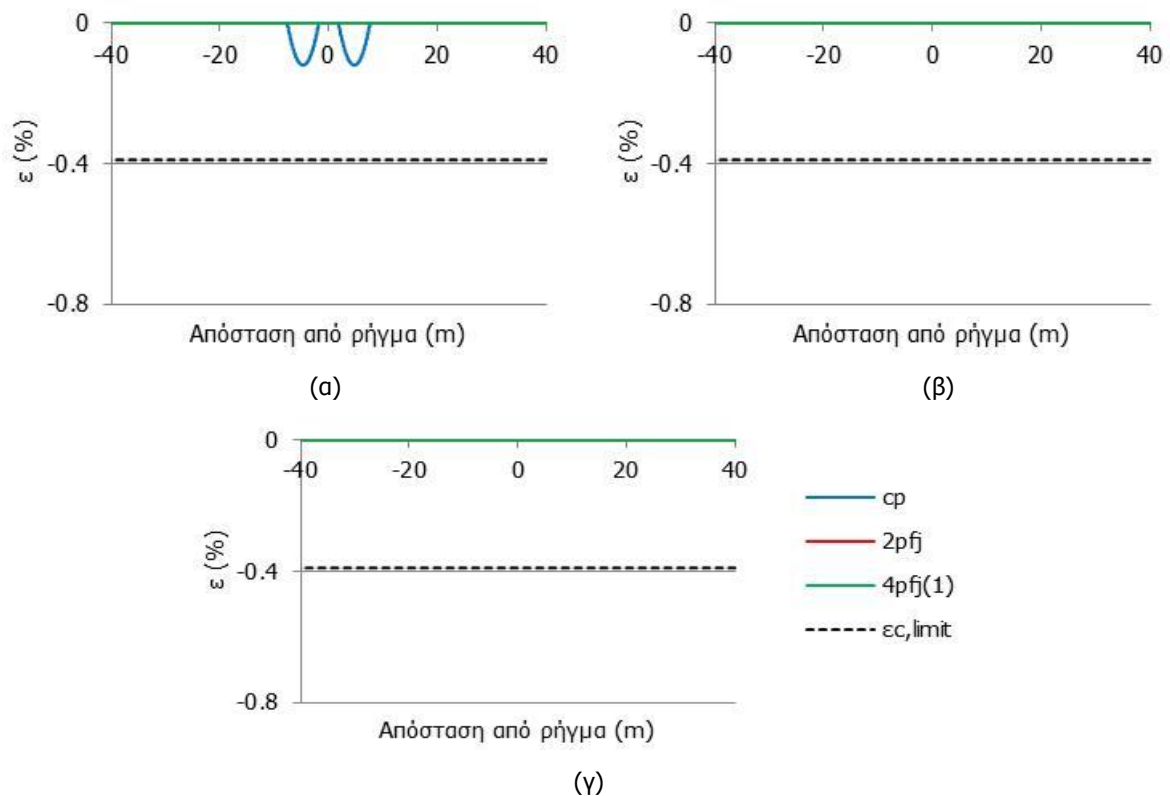


Σχήμα 2-43: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Πίνακας 2-12: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
2pfj	66.38	0	0
4pfj(1)	72.59	3.10	0

Σε ό,τι αφορά στις θλιπτικές διαμήκεις ανηγμένες παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ), ο συνεχής αγωγός εμφανίζει μηδενικές τιμές στις εξεταζόμενες περιπτώσεις με εξαίρεση την περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=0.5\text{m}$  (Σχήμα 2-44). Σε αυτή την περίπτωση όπου οι θλιπτικές παραμορφώσεις του συνεχούς αγωγού δεν υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο έναντι τοπικού λυγισμού ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ), η χρήση εύκαμπτων κόμβων μειώνει κατά περίπου 100% τις θλιπτικές παραμορφώσεις, δηλαδή σχεδόν τις μηδενίζει.



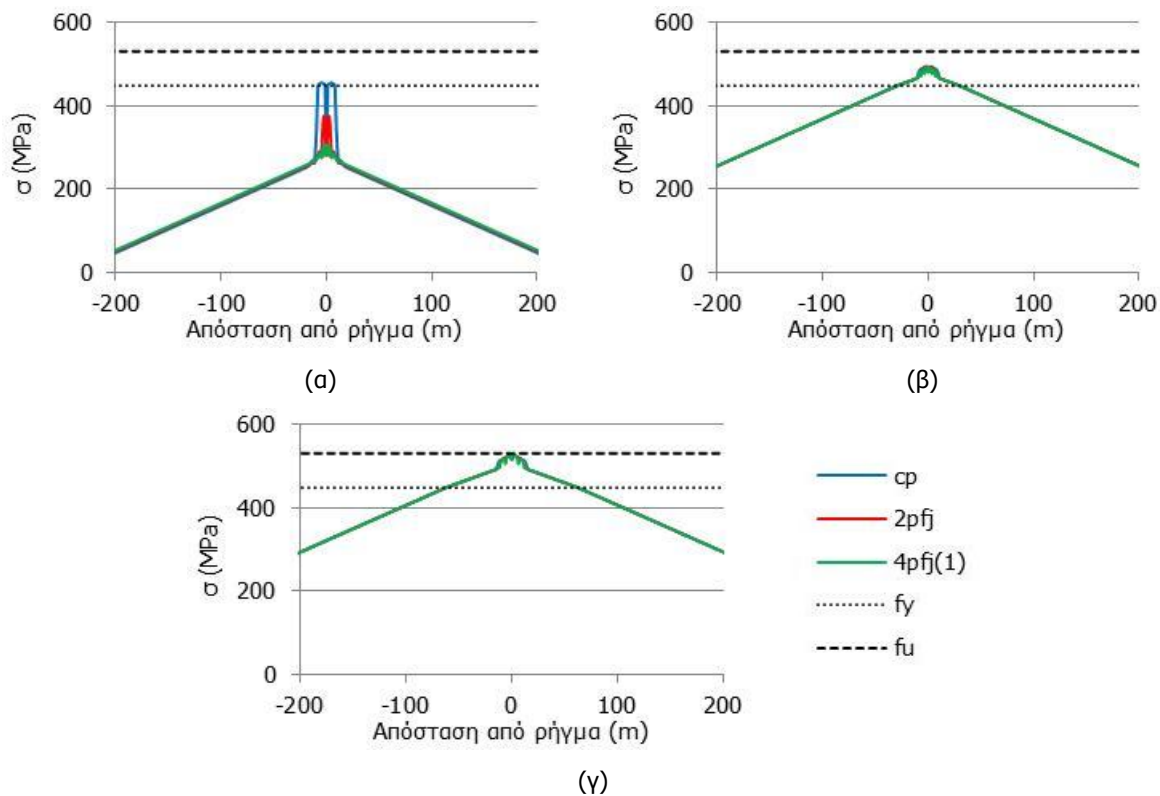
Σχήμα 2-44: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$



Πίνακας 2-13: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$	$\Delta=4.0\text{m}$
$2pf_j$	100.00	0	0
$4pf_j(1)$	100.00	0	0

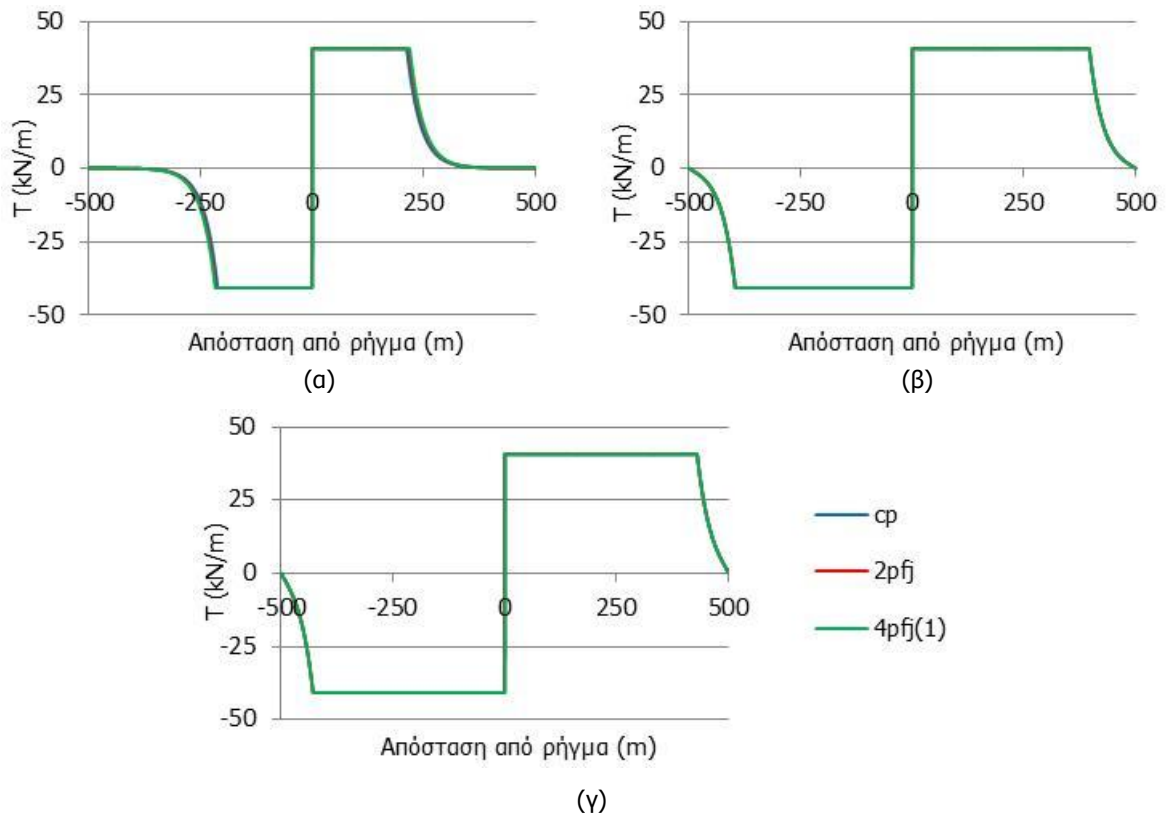
Στο Σχήμα 2-45 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος. Οι εύκαμπτοι κόμβοι, στην περίπτωση που η επιβαλλόμενη μετακίνηση είναι μικρή και ίση με  $\Delta=0.5\text{m}$ , συμβάλλουν στη μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων αρκετά κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ), και μάλιστα η περίπτωση  $4pf_j(1)$  αποδεικνύεται αποδοτικότερη. Στις υπόλοιπες όμως περιπτώσεις που μελετώνται, η χρήση των κόμβων δεν επηρεάζει τις τάσεις που αναπτύσσονται και η κατανομή των τάσεων ταυτίζεται με την κατανομή στο συνεχή αγωγό.



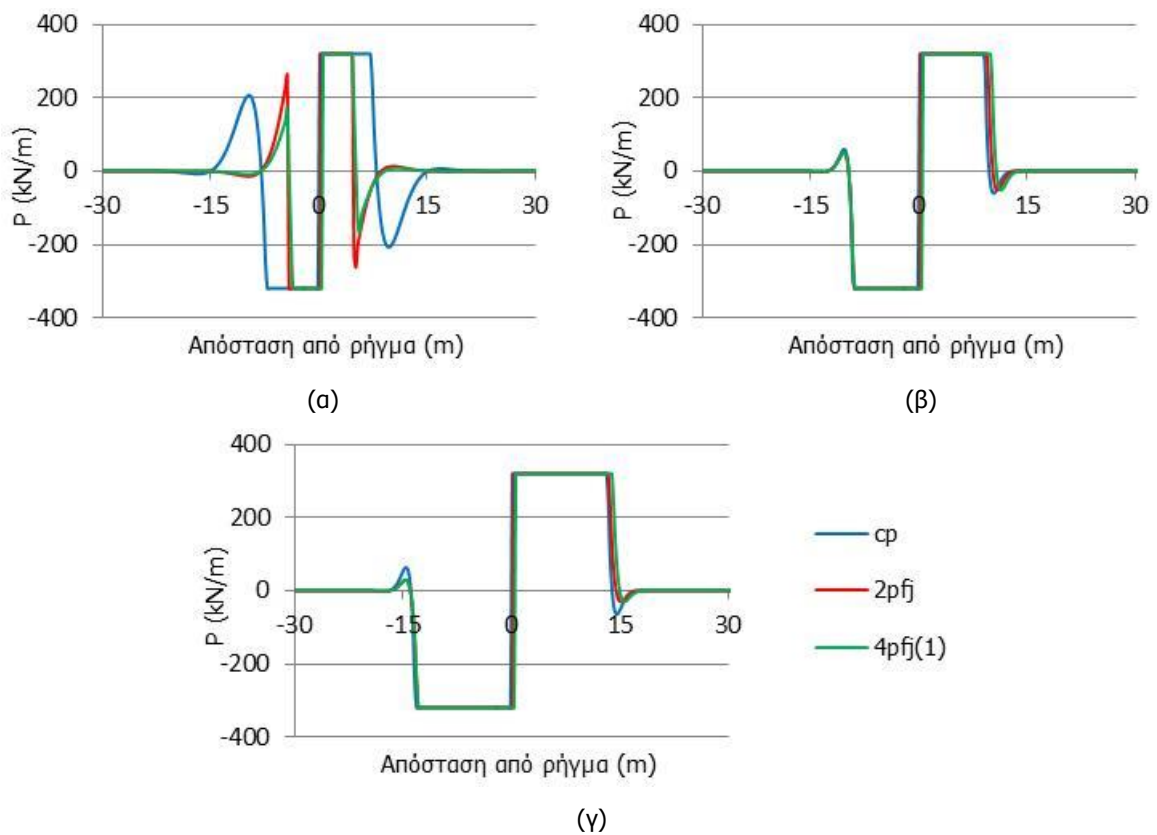
Σχήμα 2-45: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

Το εύρος πλαστικοποίησης του εδάφους δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη χρήση εύκαμπτων κόμβων όπως φαίνεται στα Σχήματα 2-46 και 2-47, στα οποία παρουσιάζεται η κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής ( $T$ ) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων ( $P$ ), αντιστοίχως. Ο αριθμός των πλευρικών ελατηρίων που διαρρέουν μειώνεται με την προσθήκη των κόμβων μόνο στην περίπτωση που η επιβαλλόμενη μετακίνηση ισούται με  $\Delta=0.5\text{m}$ .





Σχήμα 2-46: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$



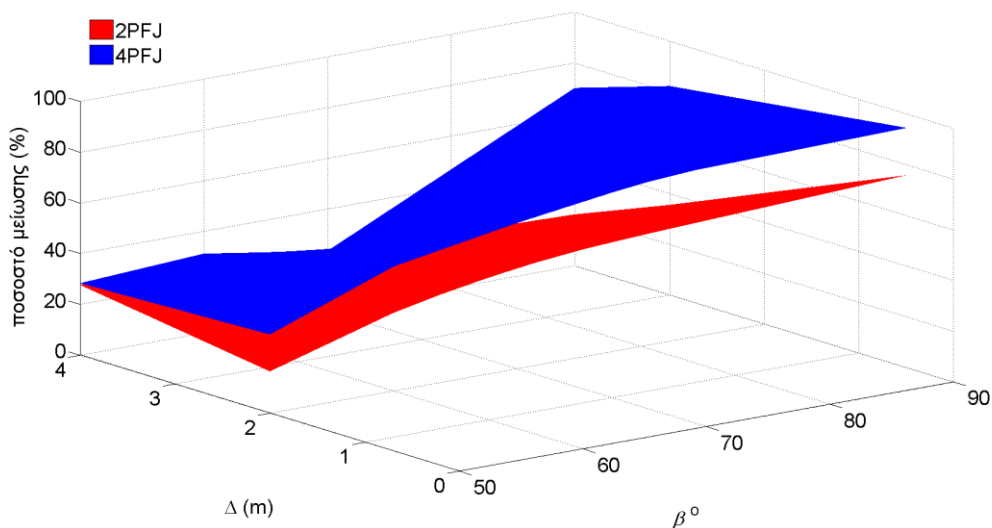
Σχήμα 2-47: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$ , (β)  $\Delta=2.0\text{m}$  και (γ)  $\Delta=4.0\text{m}$

### 2.4.3 Αποδοτικότητα εύκαμπτων κόμβων

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος αναλύσεων σχετικά με την αποδοτικότητα των κόμβων σε αγωγούς υποκείμενους σε κάμψη και εφελκυσμό. Στην ενότητα 2.4.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις στις οποίες καταδεικνύεται η επιρροή που ασκούν η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος ( $\beta$ ) και η επιβαλλόμενη μετακίνηση ( $\Delta$ ) στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Η χρήση κόμβων αποδεικνύεται ότι οδηγεί σε σημαντική μείωση των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων για γωνία  $\beta=90^\circ$ , ανεξάρτητα από το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης. Αντίθετα, στις περιπτώσεις  $\beta=50^\circ$  και  $\beta=70^\circ$  όπου κυριαρχεί η αξονική ένταση στην απόκριση του αγωγού, δεν παρατηρείται μεγάλη αποτελεσματικότητα με τη χρήση εύκαμπτων κόμβων όταν η τιμή της μετακίνησης που επιβάλλεται είναι υψηλή.

Στα Σχήματα 2-48 έως 2-50 παρουσιάζεται μία εκτίμηση της ποσοστιαίας μείωσης των καμπτικών ροπών και των ανηγμένων παραμορφώσεων του συνεχούς αγωγού με την προσθήκη 2 και 4 εύκαμπτων κόμβων, ανάλογα με την τιμή της γωνίας διασταύρωσης ( $\beta$ ) και της επιβαλλόμενης μετακίνησης ( $\Delta$ ). Η εκτίμηση αυτή προκύπτει από όλες τις αναλύσεις που έγιναν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας και οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων.

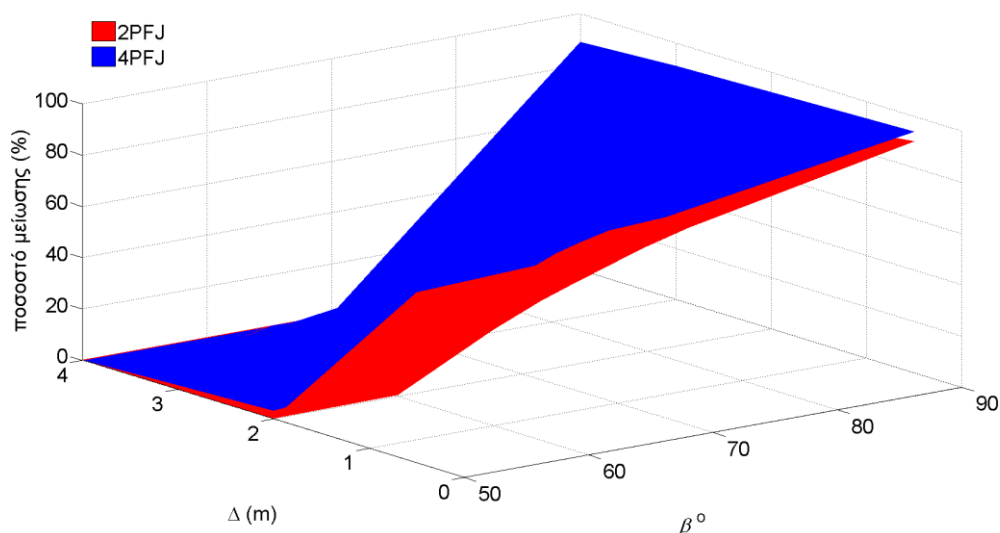
Αρχικά, από το Σχήμα 2-48 προκύπτει ότι η χρήση 4 κόμβων οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού, σε σύγκριση με τη χρήση 2 εύκαμπτων κόμβων. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τα ποσοστά μείωσης των καμπτικών ροπών είναι υψηλότερα όταν η γωνία διασταύρωσης  $\beta$  πλησιάζει τις  $90^\circ$  και όταν η επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta$  έχει χαμηλές τιμές, μικρότερες των 2m.



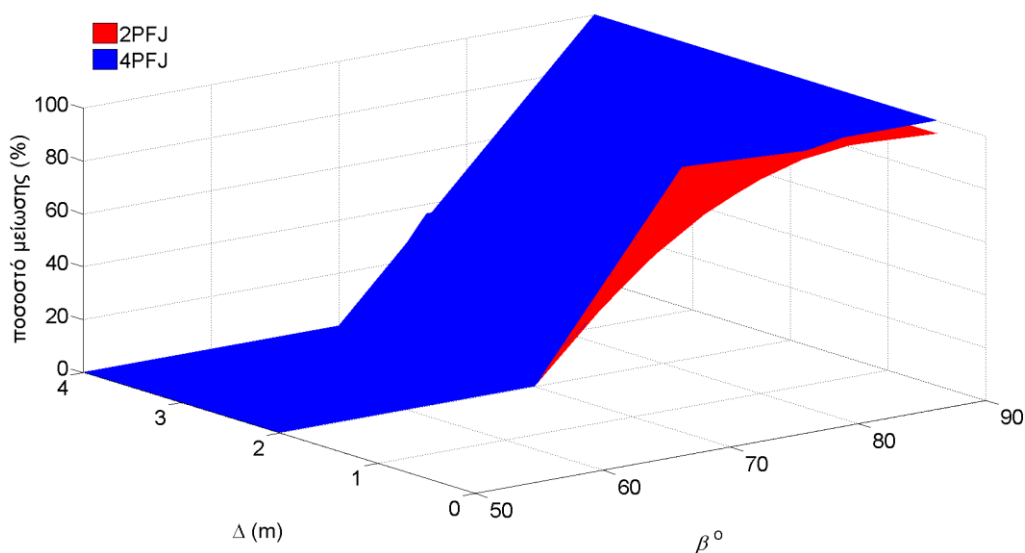
Σχήμα 2-48: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%) με τη χρήση 2 και 4 εύκαμπτων κόμβων

Στα Σχήματα 2-49 και 2-50 παρουσιάζονται τα ποσοστά μείωσης των εφελκυστικών και των θλιπτικών, αντίστοιχα, παραμορφώσεων του συνεχούς αγωγού λόγω της χρήσης εύκαμπτων κόμβων. Σε αντιστοιχία με τα ποσοστά μείωσης των καμπτικών ροπών, η μεγαλύτερη μείωση των παραμορφώσεων παρατηρείται για μεγάλες γωνίες ρήγματος ( $\beta$ ) και μικρές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης ( $\Delta$ ). Σημειώνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για γωνία  $\beta=50^\circ$  και μετακίνηση  $\Delta=4.0\text{m}$ , η χρήση κόμβων δεν οδηγεί σε απομείωση των εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (Σχήμα 2-49). Στην ίδια περίπτωση ο συνεχής αγωγός αναπτύσσει περίπου μηδενικές θλιπτικές

παραμορφώσεις και για αυτό το λόγο το αντίστοιχο ποσοστό μείωσής τους λόγω της χρήσης εύκαμπτων κόμβων είναι επίσης μηδενικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-50. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η χρήση 4 κόμβων, σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος, είναι αποδοτικότερη συγκριτικά με τη χρήση 2 κόμβων και οδηγεί σε σημαντικότερη ποσοστιαία μείωση των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών που αναπτύσσονται στον αγωγό.



Σχήμα 2-49: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%) με τη χρήση 2 και 4 εύκαμπτων κόμβων



Σχήμα 2-50: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%) με τη χρήση 2 και 4 εύκαμπτων κόμβων

## 2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται μέσω μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων η συμπεριφορά υπόγειων χαλύβδινων αγωγών που υπόκεινται σε συνδυασμό καμπτικής και αξονικής έντασης, λόγω ενεργοποίησης ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις με στόχο

τη διερεύνηση της απόκρισης τόσο του συνεχούς αγωγού όσο και αγωγών με εύκαμπτους κόμβους ώστε να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα των κόμβων. Η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποσκοπεί στη μείωση της αναπτυσσόμενης έντασης κατά μήκος του αγωγού και κυρίως στην ελάττωση των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων. Βασική επιδίωξη είναι η εξασφάλιση της ακεραιότητας του χαλύβδινου αγωγού έναντι εφελκυστικής θραύσης των συγκολλήσεων και τοπικού λυγισμού μέσω της μη υπέρβασης των κανονιστικών ορίων παραμορφώσεων για τις δύο αυτές μορφές αστοχίας.

Αρχικά, διερευνάται μέσω παραμετρικών αναλύσεων η επιρροή που ασκεί το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης στην απόκριση του συνεχούς αγωγού. Οι τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης κυμαίνονται από  $\Delta=0.5\text{m}$  έως  $\Delta=4.0\text{m}$ . Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης, ανεξάρτητα από τη γωνία διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, οδηγεί σε αύξηση των εντατικών και των παραμορφωσιακών μεγεθών, με εξαίρεση τις καμπτικές ροπές και τις θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις στις οποίες παρατηρείται μια σταδιακή μείωση λόγω της σχέσης ανάμεσα στην αξονική και την καμπτική καταπόνηση. Οι εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις αυξάνονται όταν αυξάνεται η επιβαλλόμενη μετακίνηση και σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ), γεγονός που καθιστά αναγκαία τη λήψη προληπτικών μέτρων. Στην ειδική περίπτωση  $\beta=90^\circ$  το κανονιστικό όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων για εμφάνιση τοπικού λυγισμού ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ) υπερβαίνεται ανεξάρτητα από την τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης, λόγω έντονης καμπτικής καταπόνησης της κατασκευής. Οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού ξεπερνούν το όριο διαρροής σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής της γωνίας διασταύρωσης στην απόκριση του συνεχούς αγωγού. Οι τιμές της γωνίας διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα κυμαίνονται από  $\beta=50^\circ$  έως  $\beta=90^\circ$ . Η μείωση της γωνίας του ρήγματος έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των αξονικών δυνάμεων και την ελάττωση των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού. Έτσι, όσο αυξάνεται η γωνία διασταύρωσης τόσο ο αγωγός συμπεριφέρεται ως καμπτόμενη δοκός, με τις καμπτικές ροπές και τις τέμνουσες δυνάμεις να κυριαρχούν στη συμπεριφορά του σε σχέση με τις μικρές γωνίες ρήγματος όπου κυριαρχεί η αξονική ένταση. Οι μέγιστες διαμήκεις τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση γωνίας ρήγματος υπερβαίνουν το όριο διαρροής του χάλυβα, χωρίς ωστόσο να προκαλείται ιδιαίτερη ανησυχία λόγω της κράτυνσης του υλικού και της μεγάλης του ολκιμότητας. Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις αυξάνονται όσο μικρότερη είναι η γωνία ρήγματος και το κανονιστικό όριο της εφελκυστικής θραύσης των συγκολλήσεων υπερβαίνεται στις περιπτώσεις  $\beta=50^\circ$  και  $\beta=60^\circ$  για αρκετές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης. Το κανονιστικό όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων για εμφάνιση τοπικού λυγισμού υπερβαίνεται στις περιπτώσεις που η γωνία διασταύρωσης ισούται με  $\beta=80^\circ$  και  $\beta=90^\circ$ .

Οι εύκαμπτοι κόμβοι τοποθετούνται με βάση τη θέση στην οποία παρουσιάζει μέγιστο η κατανομή των καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού, το οποίο θεωρείται πως απέχει απόσταση  $L$  από το ρήγμα (Σχήμα 2-20). Εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις αγωγών με διαφορετική χωροθέτηση και διαφορετικό πλήθος κόμβων και αξιολογείται η αποτελεσματικότητά τους ως προς τη μείωση των αναπτυσσόμενων διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων. Η χρήση 2 κόμβων σε απόσταση  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος  $[2\rho f_j]$  και η χρήση 4 κόμβων σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος  $[4\rho f_j(1)]$  αποδεικνύεται ότι έχουν τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα και εξετάζονται διεξοδικά. Στην περίπτωση  $\beta=90^\circ$  η χρήση εύκαμπτων κόμβων συμβάλλει στη σημαντική απομείωση των καμπτικών ροπών, των θλιπτικών και εφελκυστικών παραμορφώσεων και των αναπτυσσόμενων τάσεων για όλες τις τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης που εξετάζονται. Σημειώνεται, επίσης, μια μικρή αύξηση των αξονικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού. Στις περιπτώσεις  $\beta=50^\circ$  και  $\beta=70^\circ$  η ελάττωση των καμπτικών ροπών, των ανηγμένων παραμορφώσεων και των τάσεων πραγματοποιείται μόνο για μικρές μετακινήσεις, ενώ όσο αυξάνεται η

μετακίνηση τόσο μειώνεται η επίδραση των κόμβων στα εντατικά μεγέθη. Παράλληλα, σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις παρατηρείται ότι η μέγιστη στροφή των κόμβων δεν εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές και βρίσκεται εντός των κατασκευαστικών προδιαγραφών.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης περί της αποτελεσματικότητας των εύκαμπτων κόμβων είναι άκρως ενθαρρυντικά στις περιπτώσεις μεγάλης γωνίας διασταύρωσης ( $\beta$ ) και μικρής επιβαλλόμενης μετακίνησης ( $\Delta$ ), στις οποίες παρατηρείται έντονη καμπτική καταπόνηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τόσο οι εφελκυστικές όσο και οι θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις υφίστανται μεγάλη ποσοστιαία απομείωση και μειώνεται αντίστοιχα ο κίνδυνος υπέρβασης των κανονιστικών ορίων έναντι θραύσης των συγκολλήσεων του αγωγού και έναντι τοπικού λυγισμού. Αντίθετα, η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων σε χαλύβδινο αγωγό δεν είναι αποτελεσματική όταν η γωνία ρήγματος είναι μικρότερη από  $\beta=70^\circ$  και ταυτόχρονα η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης είναι μεγαλύτερη από  $\Delta=2.0\text{m}$ , περιπτώσεις στις οποίες κυριαρχεί η αξονική ένταση. Τέλος, η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων, σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος, αποδεικνύεται αποδοτικότερη σε σύγκριση με τη χρήση 2 κόμβων, σε απόσταση  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάζονται και οδηγεί σε σημαντικότερη μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων.



## 3 ΑΓΩΓΟΣ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι υπόγειοι αγωγοί είναι επιμήκη χαλύβδινα κελύφη των οποίων η απόκριση σε εφελκυστικά φορτία υπερτερεί έναντι αυτής σε θλιπτικά, καθώς στην περίπτωση της εφελκυστικής καταπόνησης η ακεραιότητα του αγωγού μπορεί να βασισθεί και στη μετελαστική αντοχή του χάλυβα. Στην περίπτωση θλιπτικής καταπόνησης ο τοπικός λυγισμός περιορίζει τη μέγιστη ένταση που μπορεί να αναπτύξει η κατασκευή, όντας η κυρίαρχη μορφή αστοχίας. Η αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού λαμβάνει χώρα για πολύ χαμηλότερη απόλυτη τιμή ανηγμένων παραμορφώσεων συγκριτικά με τις παραμορφώσεις που οδηγούν σε θραύση των συγκολλήσεων του αγωγού. Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις συνήθειες κατασκευαστικές πρακτικές, προτείνεται η αποφυγή γωνιών διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος  $\beta > 90^\circ$  κατά το σχεδιασμό, περίπτωση στην οποία ο αγωγός υπόκειται σε συνδυασμό κάμψης και θλίψης. Πολλές φορές ωστόσο κάτι τέτοιο είναι αναπόφευκτο είτε λόγω περιορισμών κατά την όδευση του αγωγού είτε λόγω ελλειπούς τεκμηρίωσης των χαρακτηριστικών του ρήγματος, με αποτέλεσμα η πραγματική γωνία  $\beta$  να μην είναι αυτή που λήφθηκε υπόψη κατά το σχεδιασμό.

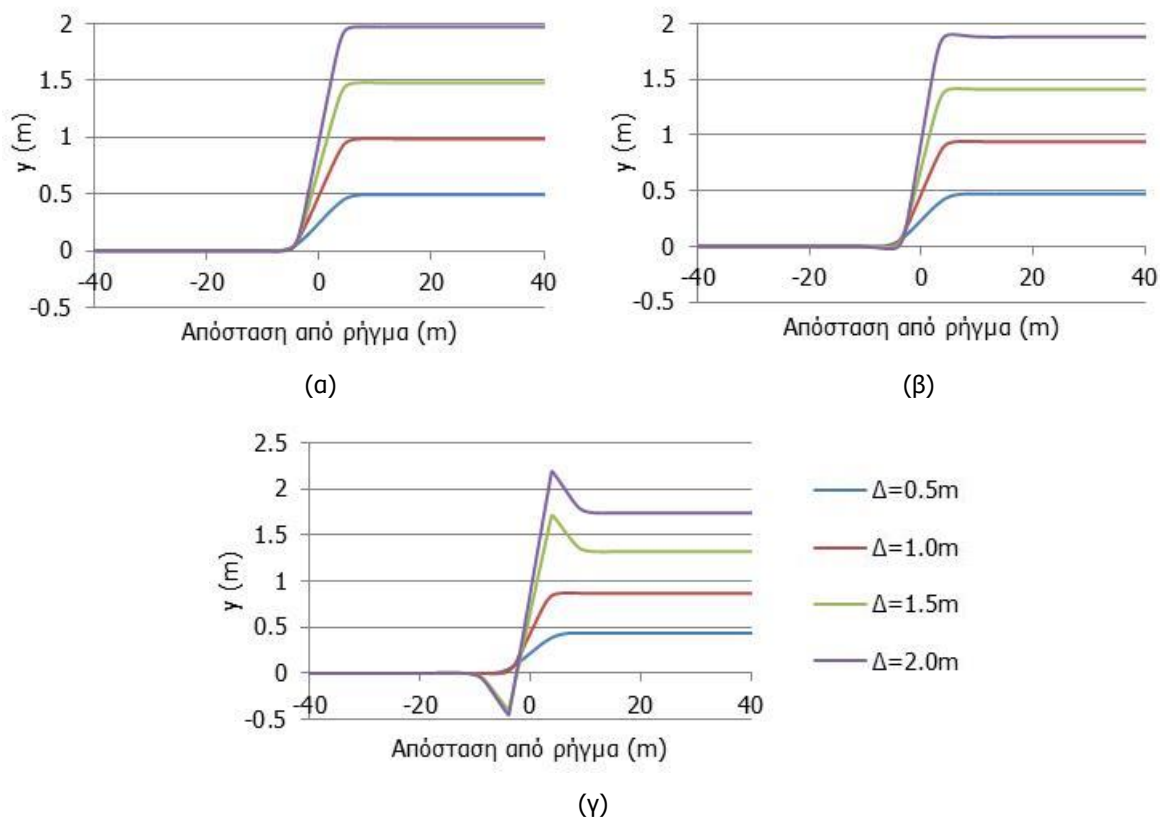
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται αγωγοί που τέμνουν ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης υπό γωνία  $\beta > 90^\circ$  (Σχήμα 1-22) και υπόκεινται σε συνδυασμό κάμψης και θλίψης. Οι γωνίες διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος που μελετώνται είναι οι  $\beta = 100^\circ$ ,  $\beta = 110^\circ$  και  $\beta = 120^\circ$ , ενώ η μέγιστη μετακίνηση που επιβάλλεται είναι  $\Delta = 2.0\text{m}$ . Αρχικά, ο συνεχής αγωγός διερευνάται μέσω παραμετρικών αναλύσεων ώστε να εκτιμηθεί η επιρροή της επιβαλλόμενης μετακίνησης του ρήγματος ( $\Delta$ ) και της γωνίας διασταύρωσης ( $\beta$ ) στην απόκρισή του. Ακολούθως, η μελέτη του συνεχούς αγωγού αποτελεί τη βάση για την τοποθέτηση των εύκαμπτων κόμβων και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους. Εξετάζονται οι περιπτώσεις αγωγών με 2 και 4 εύκαμπτους κόμβους και διερευνάται η συμβολή τους στην απομείωση των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι η εμφάνιση γωνίας  $\beta > 90^\circ$  είναι ανεπιθύμητη κατά το σχεδιασμό του αγωγού και για αυτό το λόγο η διερεύνηση μεγαλύτερων γωνιών διασταύρωσης ( $\beta$ ) και μεγαλύτερων μετακινήσεων ( $\Delta$ ) κρίνεται εκτός συνήθους πρακτικής σχεδιασμού. Η αβεβαιότητα ως προς τη θέση εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης στην

επιφάνεια του εδάφους δε λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα διερεύνηση και οι αγωγοί που μελετώνται θεωρείται ότι τέμνονται από το σεισμικό ρήγμα στο μέσον του μήκους τους που προσομοιώνεται.

### 3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

Η επίδραση της επιβαλλόμενης μετακίνησης ρήγματος ( $\Delta$ ) στην απόκριση του συνεχούς αγωγού μελετάται για τρεις διαφορετικές γωνίες διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος: (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$ . Στον αγωγό επιβάλλονται 4 χαρακτηριστικές τιμές μετακίνησης, οι οποίες κυμαίνονται από  $\Delta=0.5\text{m}$  έως  $\Delta=2.0\text{m}$ .

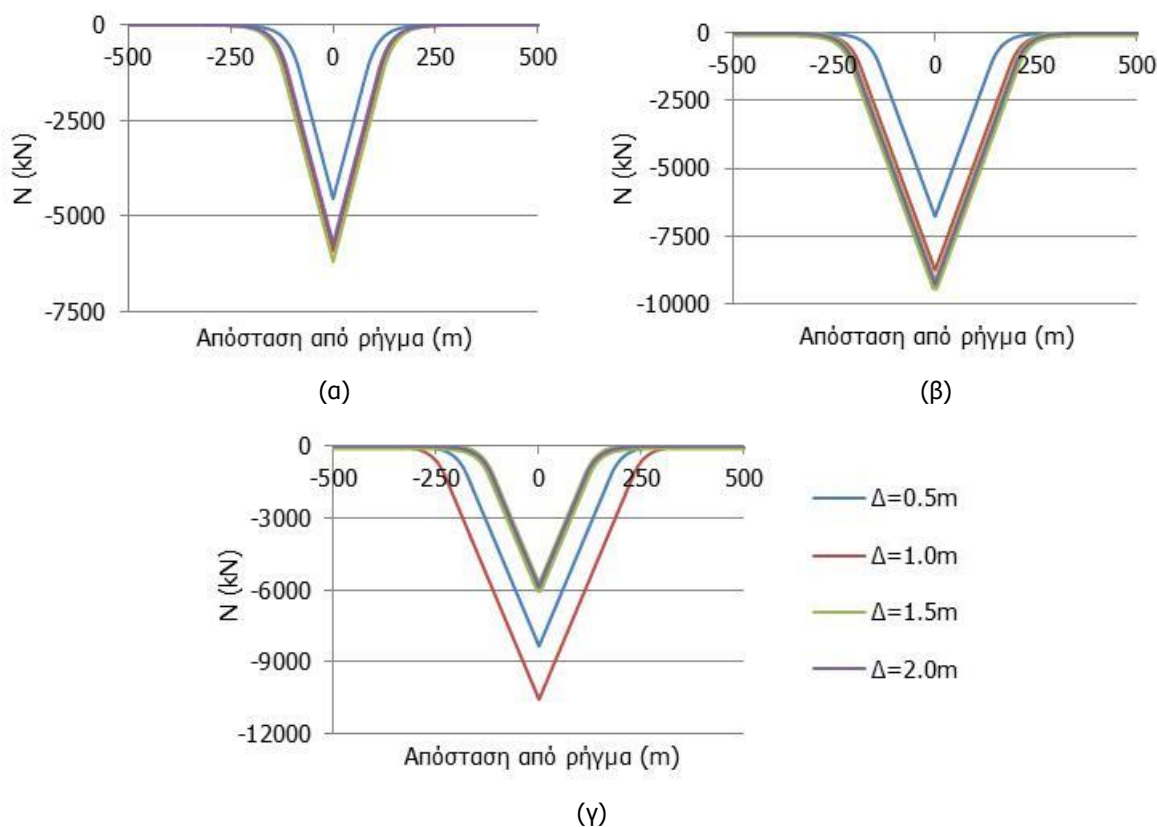
Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται η μετακίνηση ( $y$ ) του συνεχούς αγωγού, υποκείμενου σε ενεργοποίηση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Σε σύγκριση με τις γωνίες διασταύρωσης  $\beta < 90^\circ$  (Κεφάλαιο 2.2), συμπεραίνεται ότι το συνολικό μήκος του αγωγού που καμπυλώνεται είναι μικρότερο για αγωγούς υποκείμενους σε συνδυασμό κάμψης και θλίψης. Το παραμορφωμένο σχήμα του αγωγού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μία ομαλή καμπύλη τύπου «S». Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση  $\beta=120^\circ$  στην οποία παρατηρείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων για μετακίνηση μεγαλύτερη της τιμής  $\Delta=1.5\text{m}$ .



Σχήμα 3-1: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$

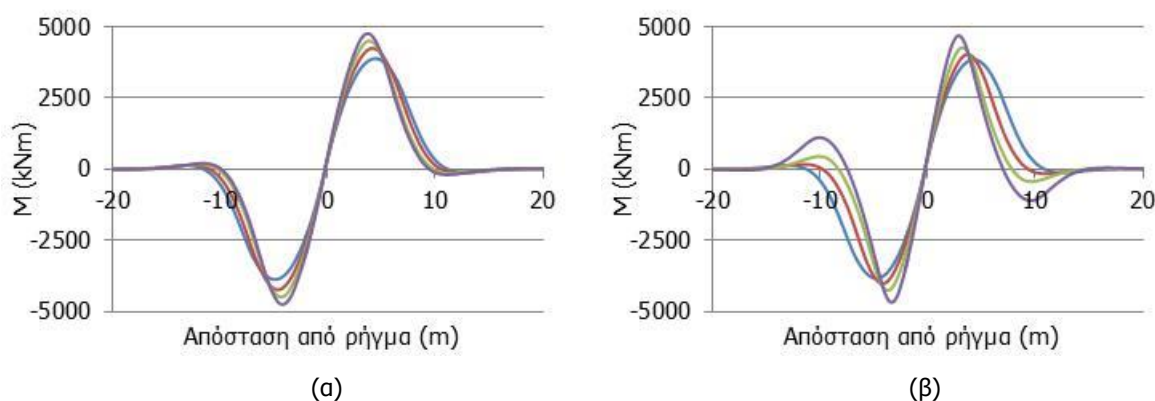
Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  οδηγεί σε αύξηση των αξονικών θλιπτικών δυνάμεων (N) κατά μήκος του αγωγού (Σχήμα 3-2). Δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στην κατανομή των αξονικών δυνάμεων όταν η μετακίνηση υπερβαίνει την τιμή  $\Delta=1.0\text{m}$ . Μείωση των αξονικών δυνάμεων παρατηρείται μόνο στις περιπτώσεις γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta \geq 1.5\text{m}$  στις οποίες ο συνεχής αγωγός αστοχεί.

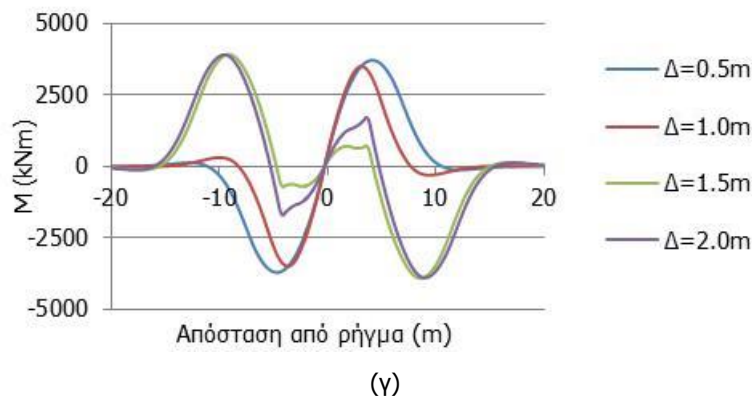




Σχήμα 3-2: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$

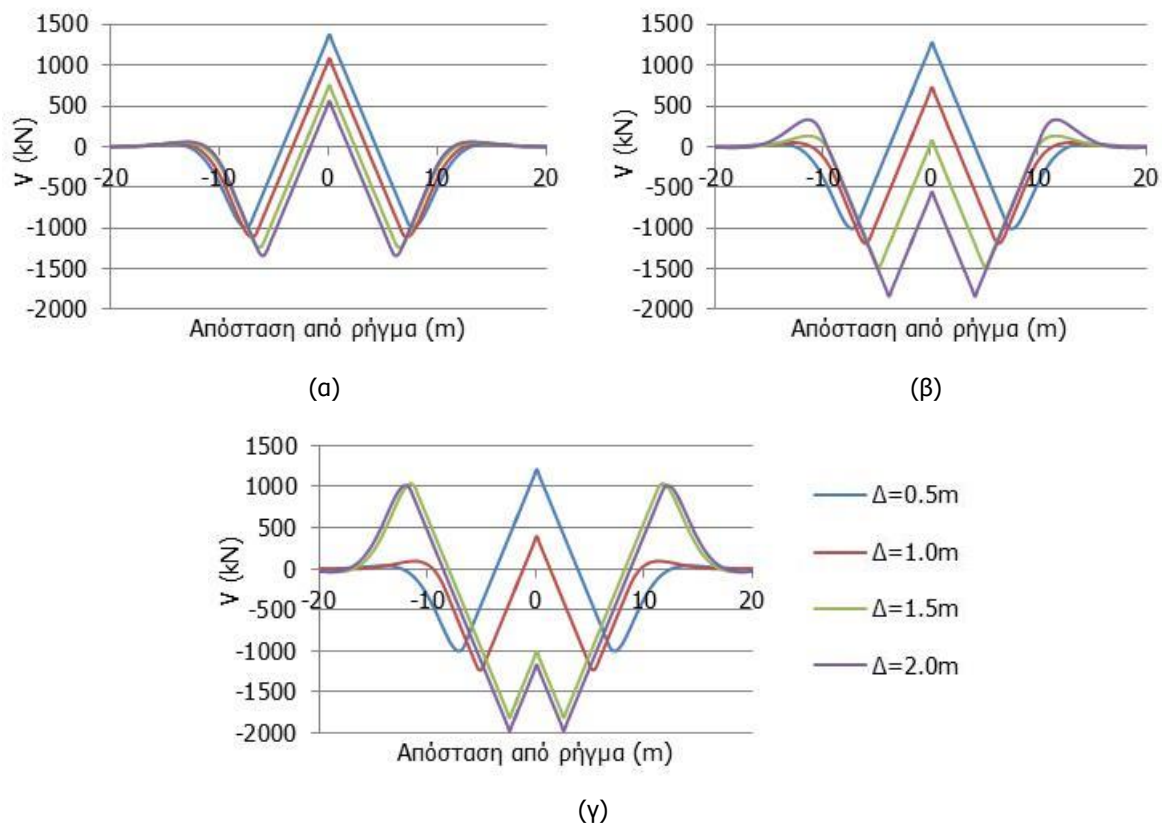
Στο Σχήμα 3-3 απεικονίζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών ( $M$ ) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης οδηγεί σε μικρή αύξηση των καμπτικών ροπών, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η απόσταση της θέσης μεγιστοποίησής τους από το ίχνος του ρήγματος. Στην περίπτωση γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta \geq 1.5\text{m}$ , σύμφωνα με το Σχήμα 3-3(γ), παρατηρείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων και η διαφοροποίηση της κατανομής των καμπτικών ροπών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, με την παρουσία χαρακτηριστικών «αιχμών» στο διάγραμμα.





Σχήμα 3-3: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$

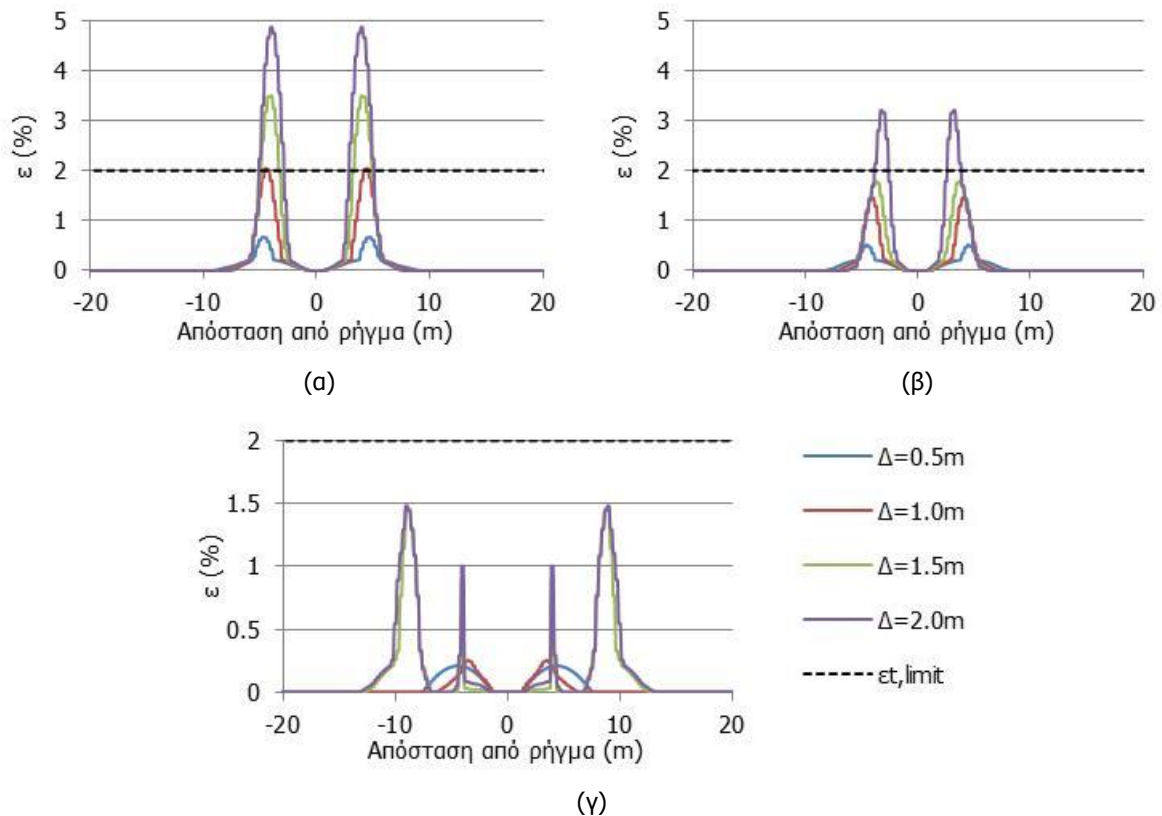
Οι τέμνουσες δυνάμεις ( $V$ ) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού μειώνονται όσο αυξάνεται η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  (Σχήμα 3-4). Αξιοσημείωτες είναι οι περιπτώσεις γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=1.5\text{m}$  ή  $\Delta=2.0\text{m}$  στις οποίες δε διαπιστώνεται σημαντική απόκλιση στα αποτελέσματα καθώς έχουμε το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων.



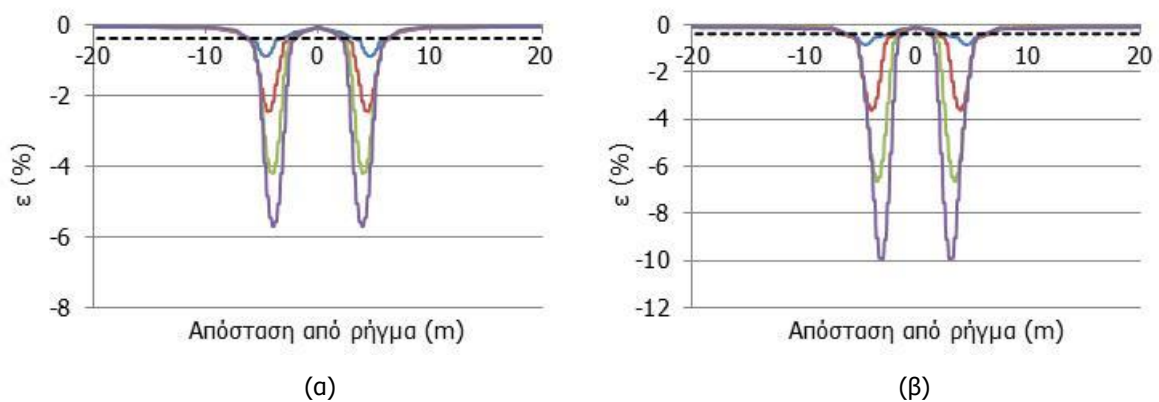
Σχήμα 3-4: Κατανομή τέμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$

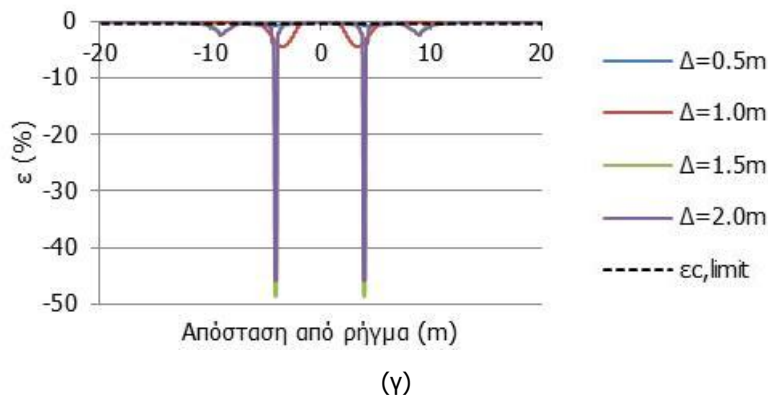
Στα Σχήματα 3-5 και 3-6 παρουσιάζεται η κατανομή των εφελκυστικών και των θλιπτικών, αντίστοιχα, ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του αγωγού. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  οδηγεί σε αύξηση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων σε όλες τις γωνίες διασταύρωσης  $\beta$  που εξετάζονται. Σύμφωνα με το Σχήμα 3-5, στις γωνίες  $\beta=100^\circ$  και  $\beta=110^\circ$  και για ορισμένες τιμές της μετακίνησης οι εφελκυστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται

υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ) με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος για την ακεραιότητα των συγκολλήσεων του αγωγού. Ο κίνδυνος, ωστόσο, εμφάνισης τοπικού λυγισμού είναι αρκετά εντονότερος για γωνίες διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος  $\beta > 90^\circ$  καθώς σε αυτές τις γωνίες η θλίψη διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στη συμπεριφορά του αγωγού. Οι θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές και είναι υπερπολλαπλάσιες του αντίστοιχου κανονιστικού ορίου ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ) σε όλες τις περιπτώσεις (Σχήμα 3-6). Ειδικότερα στις περιπτώσεις που αστοχεί ο συνεχής αγωγός ( $\beta=120^\circ$  και  $\Delta \geq 1.5\text{m}$ ), παρατηρούνται εξαιρετικά υψηλές τιμές στις θλιπτικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος του συνεχούς αγωγού.



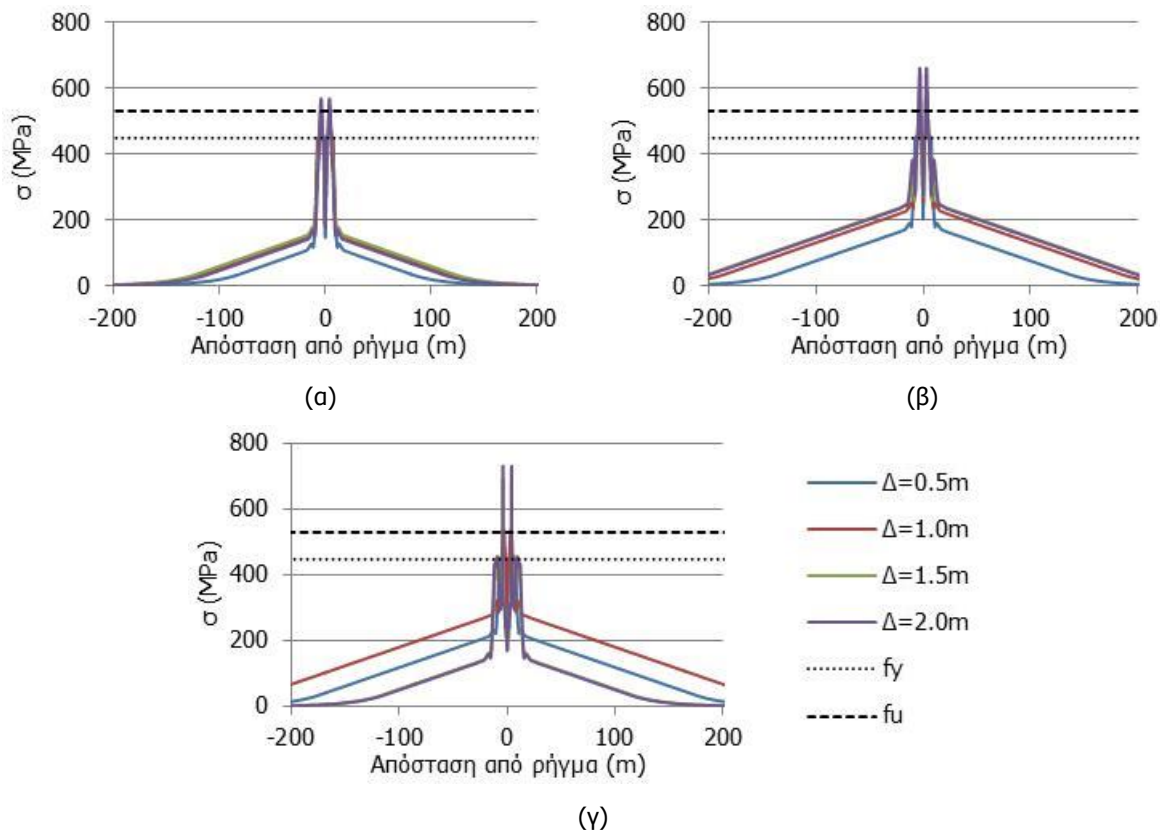
Σχήμα 3-5: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$





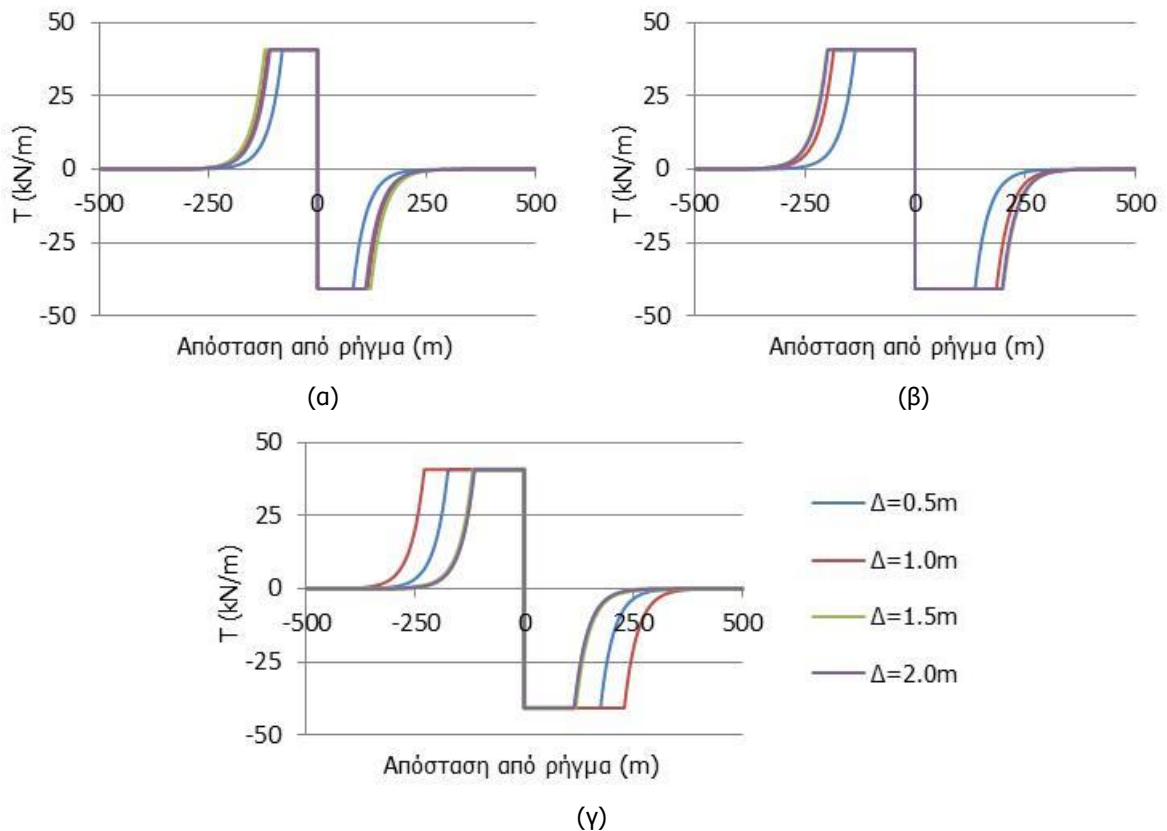
Σχήμα 3-6: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$

Από την κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού (Σχήμα 3-7) προκύπτει ότι οι τάσεις μεγιστοποιούνται στην περιοχή του ρήγματος και υπερβαίνουν το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ) σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η υπέρβαση αυτή, ωστόσο, δεν προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία λόγω της ολκιμότητας του χάλυβα. Η μικρή και απότομη πτώση των αναπτυσσόμενων τάσεων που παρατηρείται στην περιοχή του ρήγματος οφείλεται στο γεγονός ότι ο αγωγός «στρίβει» στη συγκεκριμένη περιοχή, σύμφωνα με τον παραμορφωμένο φορέα (Σχήμα 3-1). Τέλος, συμπεραίνεται ότι η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης προκαλεί μια μικρή αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά μήκος του αγωγού με μοναδική εξαίρεση τις περιπτώσεις στις οποίες σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις για γωνία  $\beta=120^\circ$ .

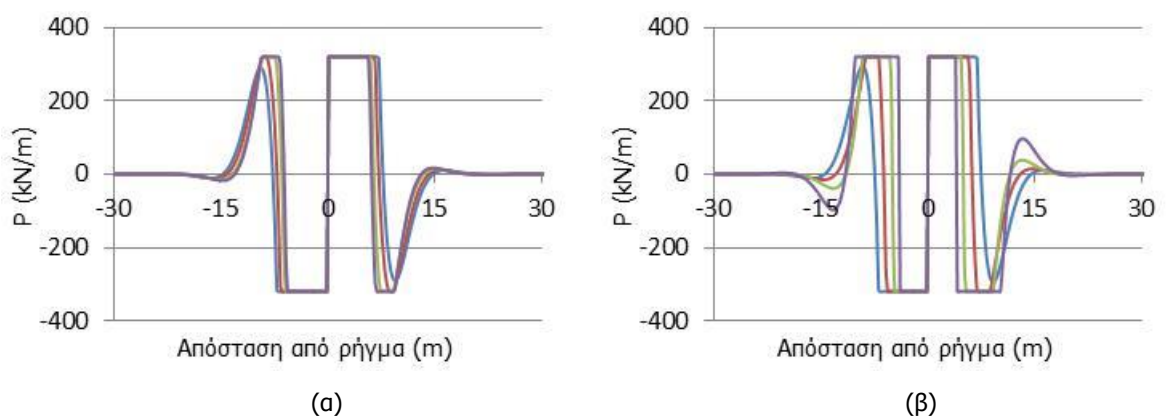


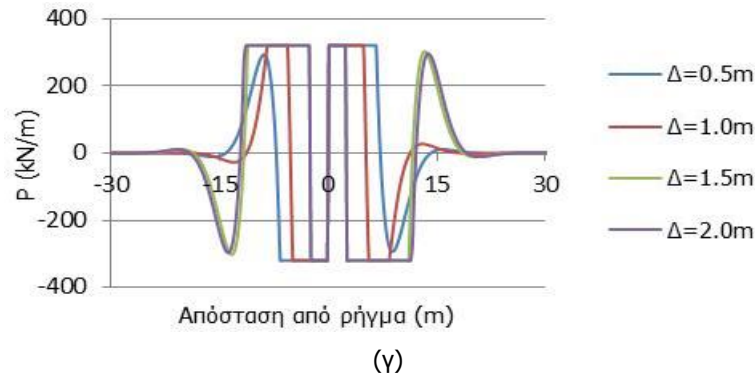
Σχήμα 3-7: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$

Στα Σχήματα 3-8 και 3-9 απεικονίζεται η κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (P), αντίστοιχα. Από το Σχήμα 3-8 προκύπτει ότι η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης οδηγεί σε αύξηση του μήκους πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιοχή του ρήγματος. Επιπλέον δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στα αποτελέσματα για μετακινήσεις  $\Delta \geq 1\text{m}$ , ενώ μείωση του εύρους πλαστικοποίησης παρατηρείται μόνο στις περιπτώσεις που αστοχεί ο συνεχής αγωγός για γωνία  $\beta=120^\circ$ . Σε ό,τι αφορά τα πλευρικά ελατήρια (Σχήμα 3-9), οι δυνάμεις εδαφικής αντίστασης είναι ανάλογες της μετακίνησης του ρήγματος και εξαρτώνται από τη μετακίνηση του αγωγού στο όρυγμα (Σχήμα 3-1).



Σχήμα 3-8: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$



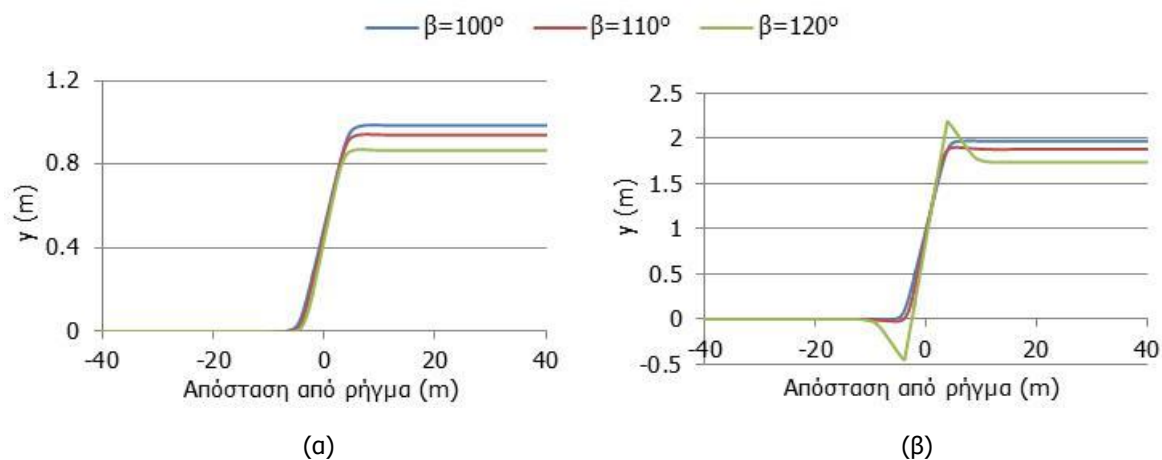


Σχήμα 3-9: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για γωνίες διασταύρωσης (α)  $\beta=100^\circ$ , (β)  $\beta=110^\circ$  και (γ)  $\beta=120^\circ$

### 3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΑΓΩΓΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ ΑΓΩΓΟΥ – ΡΗΓΜΑΤΟΣ

Η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση ενός αγωγού κατά τη διέλευσή του από μια περιοχή με ενεργό ρήγμα. Κατά την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος ο αγωγός υποβάλλεται σε μετακίνηση και από την ανάλυσή της σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη με τον αγωγό και μία κάθετη σε αυτόν (Σχήμα 1-22), προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία διασταύρωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η θλιπτική δύναμη που δέχεται ο αγωγός. Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η επίδραση της γωνίας διασταύρωσης στην απόκριση ενός συνεχούς αγωγού για δύο διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$ , ενώ οι γωνίες που εξετάζονται είναι οι  $\beta=100^\circ$ ,  $\beta=110^\circ$  και  $\beta=120^\circ$ . Η μελέτη μεγαλύτερων γωνιών δεν έχει πρακτικό νόημα καθώς οι γωνίες  $\beta>90^\circ$  αποφεύγονται συνήθως κατά το σχεδιασμό του αγωγού.

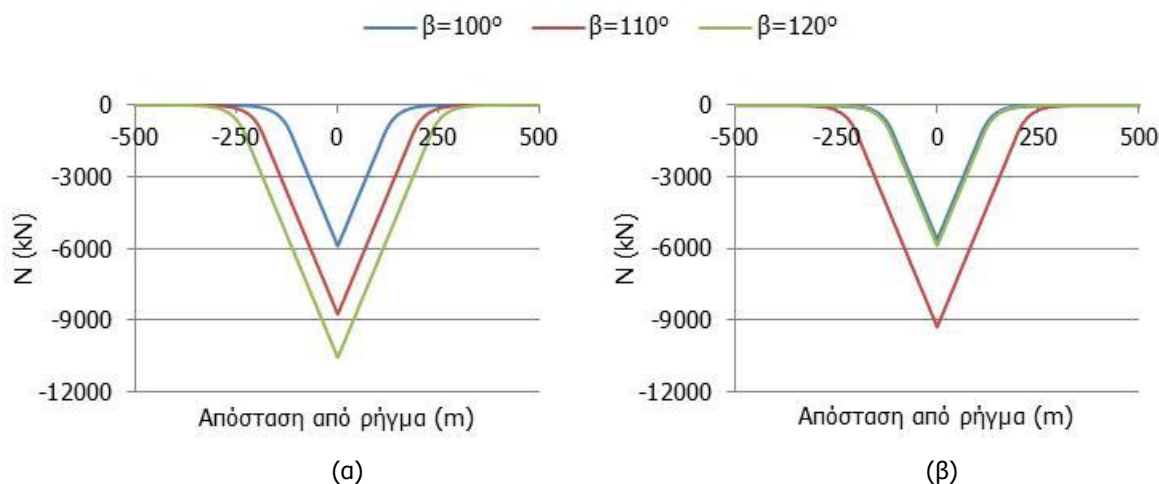
Αρχικά, στο Σχήμα 3-10 απεικονίζεται η μετακίνηση (y) του αγωγού καθώς υπόκειται σε ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Οι μικρότερες γωνίες  $\beta$  οδηγούν σε μεγαλύτερη απομάκρυνση του αγωγού από την αρχική του θέση, όπως προκύπτει από την ανάλυση της επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta$  σε δύο συνιστώσες, εκ των οποίων η παράλληλη με τον αγωγό συνιστώσα εντείνει αξονικά τον αγωγό. Η παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού είναι μια ομαλή καμπύλη τύπου «S» με μόνη εξαίρεση την περίπτωση γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  κατά την οποία παρατηρείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων.



Σχήμα 3-10: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

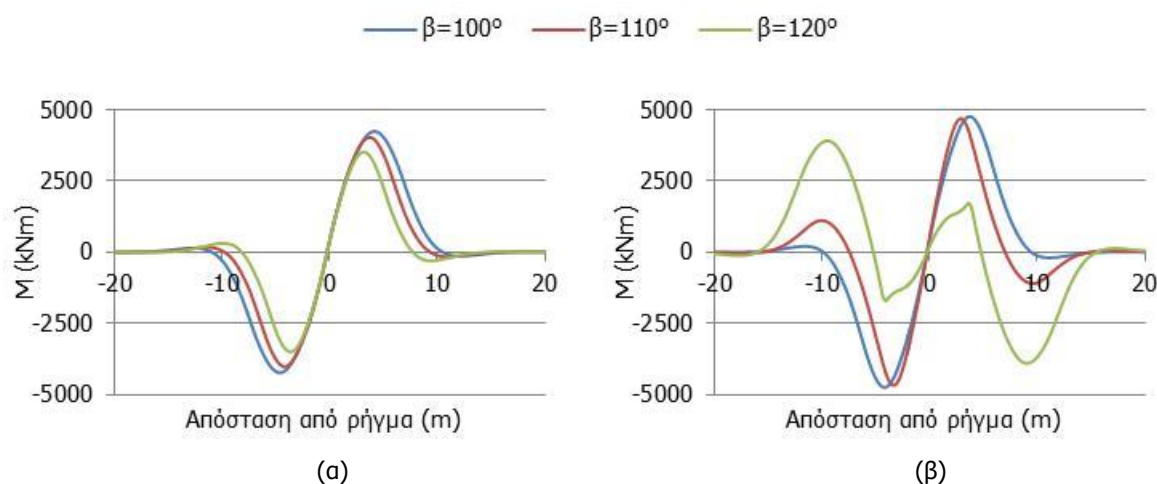


Η αύξηση της γωνίας διασταύρωσης  $\beta$  οδηγεί σε αύξηση των θλιπτικών δυνάμεων (N) αφού αυξάνεται η τιμή της παράλληλης με τον αγωγό συνιστώσας της μετακίνησης και άρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θλιπτικές δυνάμεις (Σχήμα 3-11). Μείωση των θλιπτικών δυνάμεων παρά την αύξηση της γωνίας  $\beta$  παρατηρείται μονάχα στην περίπτωση που αστοχεί ο συνεχής αγωγός, δηλαδή για γωνία  $\beta=120^\circ$  και  $\Delta=2.0\text{m}$ .

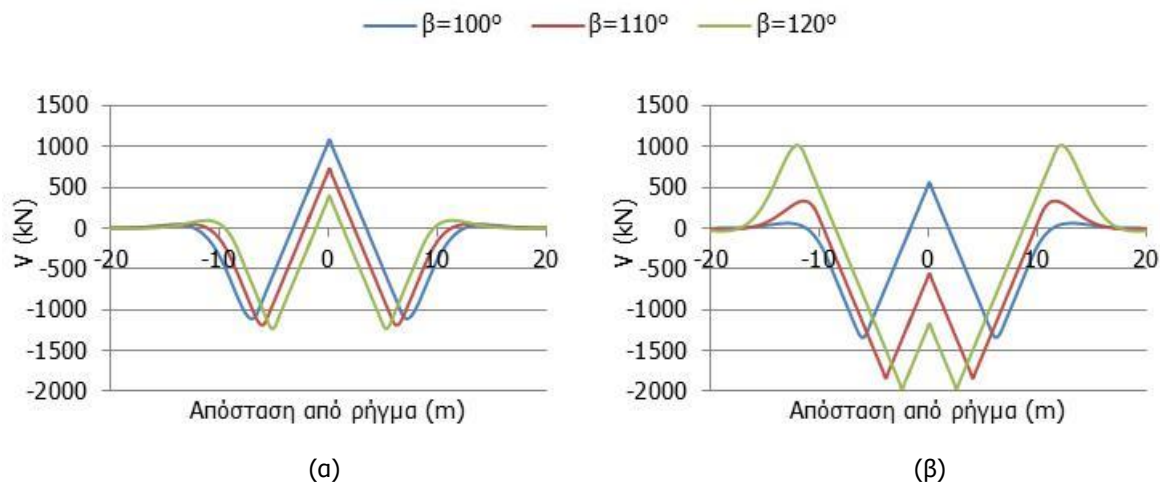


Σχήμα 3-11: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Οι κατανομές των καμπτικών ροπών (M) και των τεμνουσών δυνάμεων (V) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού παρουσιάζονται, αντίστοιχα, στα Σχήματα 3-12 και 3-13. Η κάμψη υπερिσχύει της θλιπτικής έντασης όσο μικρότερη είναι η γωνία  $\beta$ , και συγκεκριμένα όσο περισσότερο πλησιάζει την τιμή  $\beta=90^\circ$ . Για αυτό το λόγο η αύξηση της γωνίας διασταύρωσης οδηγεί σε μια μικρή ελάττωση των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών, όπως επίσης ελαττώνεται και η απόσταση του ίχνους του ρήγματος από τη θέση μεγιστοποίησής τους (Σχήμα 3-12). Η αύξηση της γωνίας  $\beta$  συμβάλλει και στη μεταβολή της κατανομής των τεμνουσών δυνάμεων σύμφωνα με το Σχήμα 3-13. Η περίπτωση  $\beta=120^\circ$  και  $\Delta=2.0\text{m}$  με το σχηματισμό των πλαστικών αρθρώσεων παρουσιάζει διαφοροποιήσεις, όπως είναι αναμενόμενο, τόσο στην κατανομή των καμπτικών ροπών όσο και των τεμνουσών δυνάμεων.

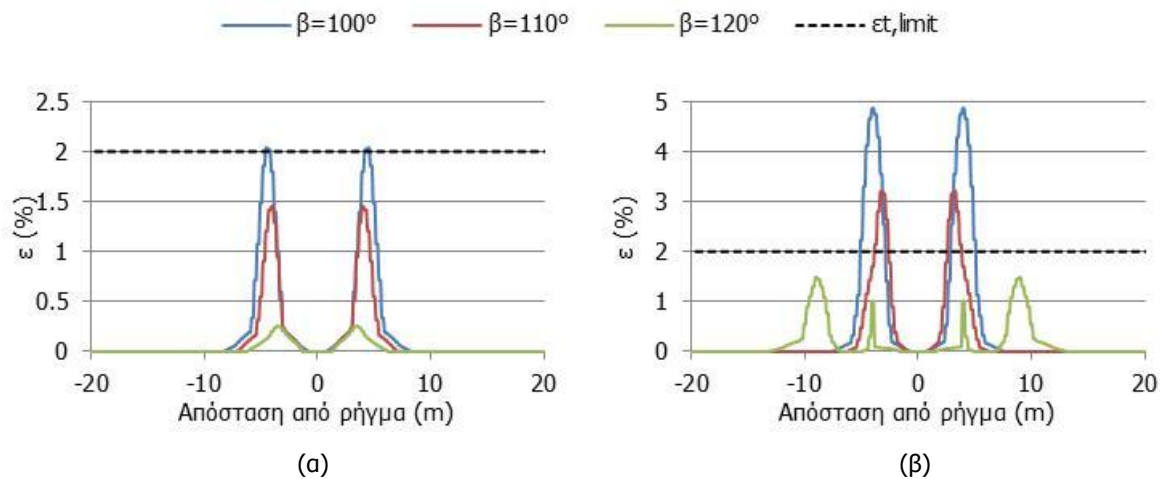


Σχήμα 3-12: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$



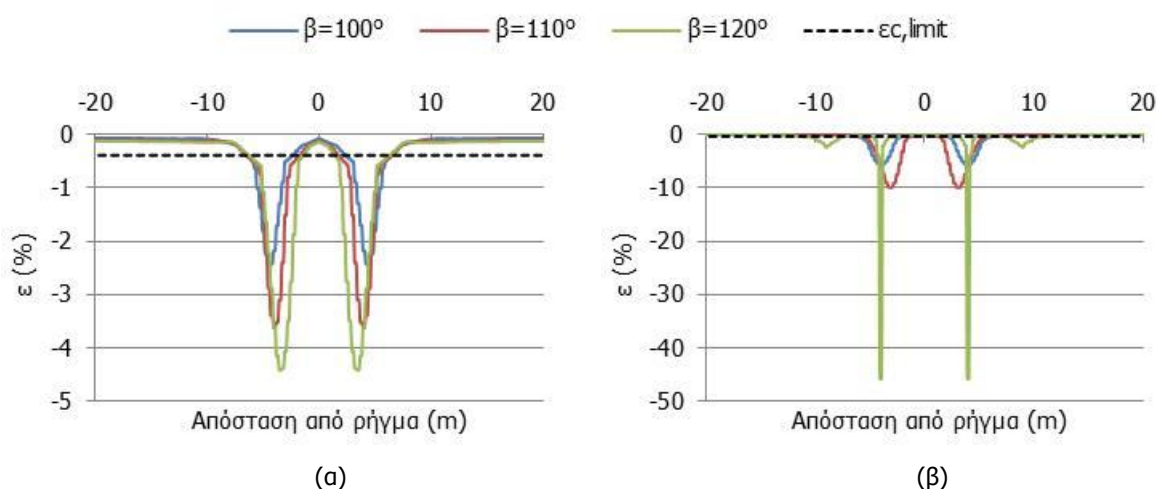
Σχήμα 3-13: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Οι ανηγμένες εφελκυστικές παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του συνεχούς αγωγού αυξάνονται όσο μειώνεται η γωνία διασταύρωσης  $\beta$  καθώς υπερσχύει η καμπτική καταπόνηση του αγωγού (Σχήμα 3-14). Το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ) δεν υπερβαίνεται για μετακίνηση  $\Delta=1.0\text{m}$  σε καμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Αντίθετα, όταν η μετακίνηση έχει τιμή  $\Delta=2.0\text{m}$  παρατηρείται υπέρβαση του κανονιστικού ορίου με άμεσο κίνδυνο θραύσης των συγκολλήσεων του αγωγού. Οι θλιπτικές παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-15, από το οποίο διαπιστώνεται ότι η αύξηση της γωνίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος οδηγεί σε αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων. Οι τιμές που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα υψηλές και υπερβαίνουν κατά πολύ το κανονιστικό όριο για τοπικό λυγισμό ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ), ενώ αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$ .



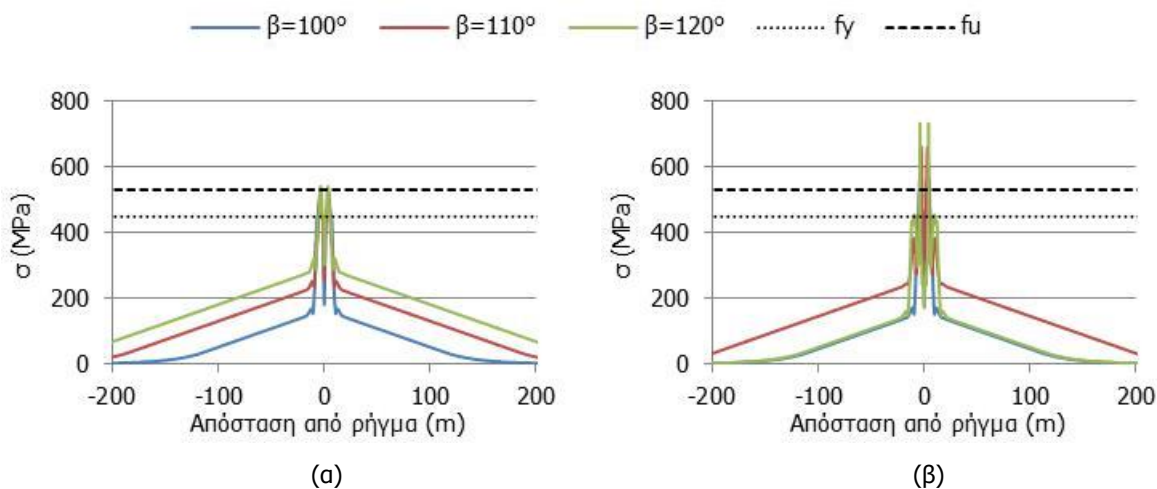
Σχήμα 3-14: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$





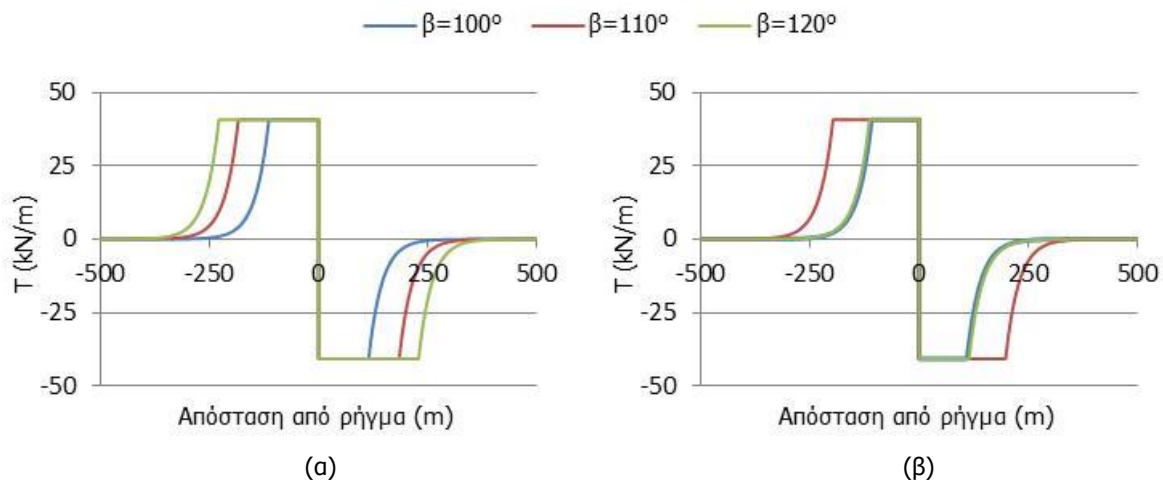
Σχήμα 3-15: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Στο Σχήμα 3-16 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων ( $\sigma$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού για τις τρεις γωνίες διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος που εξετάζονται. Συμπεραίνεται ότι η αύξηση της γωνίας  $\beta$  οδηγεί σε αύξηση των αναπτυσσόμενων τάσεων, οι οποίες σε όλες τις περιπτώσεις υπερβαίνουν το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ). Η κατανομή των τάσεων διαφέρει στην περίπτωση που αστοχεί ο συνεχής αγωγός, δηλαδή για  $\beta=120^\circ$  και  $\Delta=2.0\text{m}$

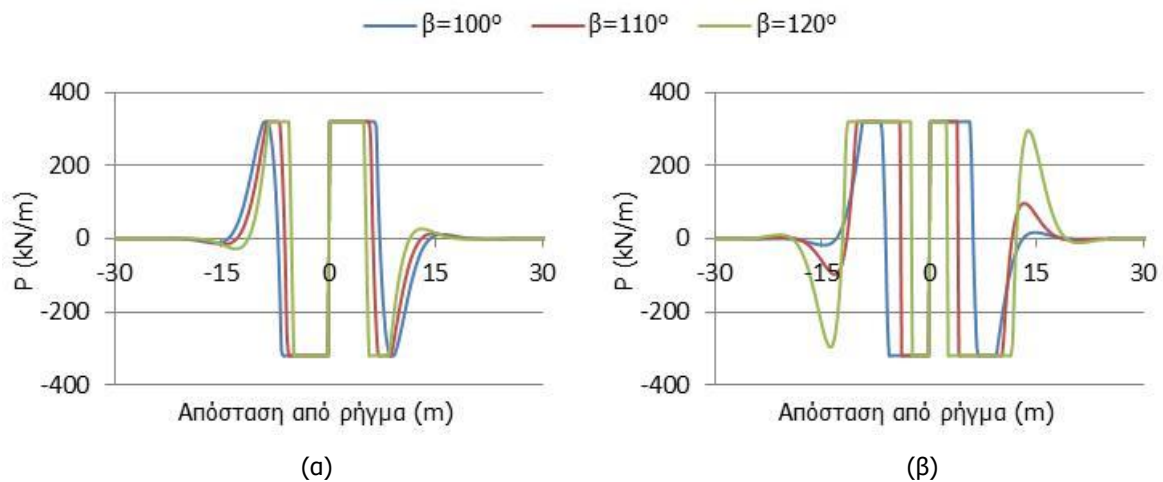


Σχήμα 3-16: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Το μήκος του εδάφους που πλαστικοποιείται αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία διασταύρωσης  $\beta$ , όπως φαίνεται από την κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) στο Σχήμα 3-17. Η μεταβολή της γωνίας  $\beta$  οδηγεί και σε διαφοροποιήσεις στην κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων (P), καθώς οι εδαφικές δυνάμεις είναι ανάλογες της μετακίνησης του ρήγματος (Σχήμα 3-18). Το εύρος πλαστικοποίησης του εδάφους διαφέρει για την περίπτωση γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  στην οποία σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στο συνεχή αγωγό.



Σχήμα 3-17: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$



Σχήμα 3-18: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=1.0\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

### 3.4 ΧΡΗΣΗ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

#### 3.4.1 Κριτήρια χωροθέτησης εύκαμπτων κόμβων

Η κατανομή των καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού αποτελεί τη βάση για την τοποθέτηση των εύκαμπτων κόμβων. Οι θέσεις μεγιστοποίησης των καμπτικών ροπών εκατέρωθεν του ρήγματος θεωρείται ότι απέχουν απόσταση  $L$  από το ίχνος του ρήγματος (Σχήμα 2-20). Στην παρούσα ενότητα που διερευνώνται γωνίες διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος  $\beta > 90^\circ$  και δεδομένων των αποτελεσμάτων για γωνίες  $\beta \leq 90^\circ$  (Κεφάλαιο 2), οι περιπτώσεις που εξετάζονται αφορούν τη χρήση 2 και 4 εύκαμπτων κόμβων και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1. Σκοπός είναι η αξιολόγηση της αποδοτικότητας των εύκαμπτων κόμβων σε κάθε περίπτωση ως προς την απομείωση της αναπτυσσόμενης έντασης και κυρίως τον περιορισμό των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων του συνεχούς αγωγού.

Πίνακας 3-1: Περιπτώσεις ως προς το πλήθος και τη θέση των εύκαμπτων κόμβων

Περίπτωση	Πλήθος κόμβων	Θέσεις κόμβων ως προς το ίχνος του ρήγματος
cp	-	-
2pfj	2	-L,+L
4pfj(1)	4	-L/2, -L, +L/2, +L

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα μετακινήσεων, αξονικών και τεμνουσών δυνάμεων, καμπτικών ροπών, εφελκυστικών και θλιπτικών διαμήκων παραμορφώσεων, τάσεων και αξονικών και εγκάρσιων ελατηρίων για ορισμένες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις ως προς τη γωνία διασταύρωσης  $\beta$  και την επιβαλλόμενη μετακίνηση  $\Delta$ . Οι γωνίες διασταύρωσης που εξετάζονται είναι οι  $\beta=100^\circ$ ,  $\beta=110^\circ$  και  $\beta=120^\circ$ , ενώ οι τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης είναι οι  $\Delta=0.5\text{m}$  και  $\Delta=2.0\text{m}$ . Σε κάθε περίπτωση μετράται η γωνία παραμόρφωσης των κόμβων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-19.

### 3.4.2 Αποτελέσματα διερεύνησης

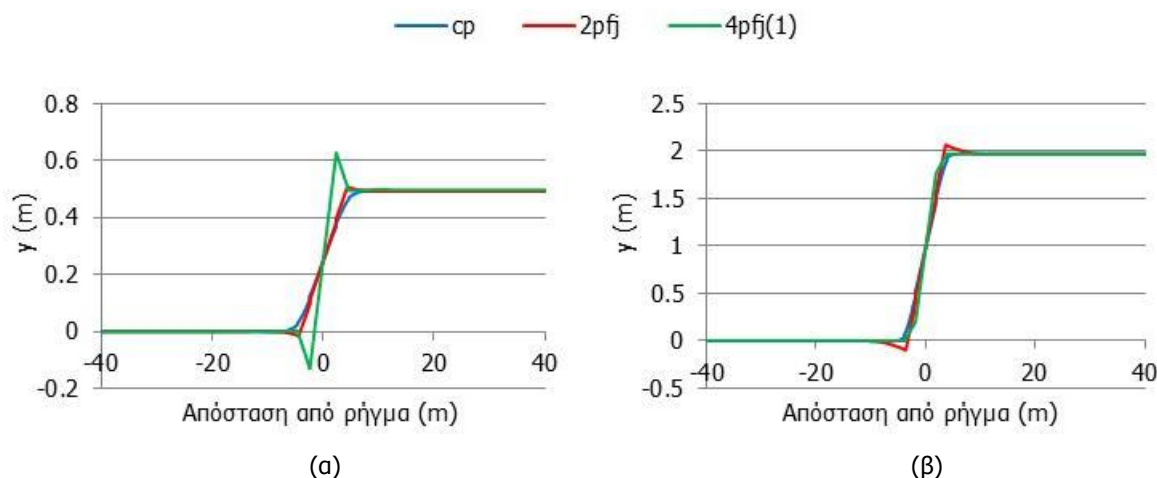
#### 3.4.2.1 Γωνία διασταύρωσης $\beta=100^\circ$

Στα Σχήματα 3-19 έως 3-27 παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό και στους αγωγούς με 2 κόμβους [2pfj] και 4 κόμβους [4pfj] για δύο διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$ . Η απόσταση L, η οποία προκύπτει με βάση το διάγραμμα καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού (Σχήμα 2-20), στις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται ισούται με: (α) 4.50m και (β) 4.00m, αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη στροφή κόμβου στις εξεταζόμενες περιπτώσεις (Πίνακας 3-2), παρατηρείται για χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων [4pfj(1)], μετακίνηση  $\Delta=2.0\text{m}$  και έχει τιμή  $18.94^\circ$ .

Πίνακας 3-2: Μέγιστη στροφή εύκαμπτου κόμβου ( $^\circ$ )

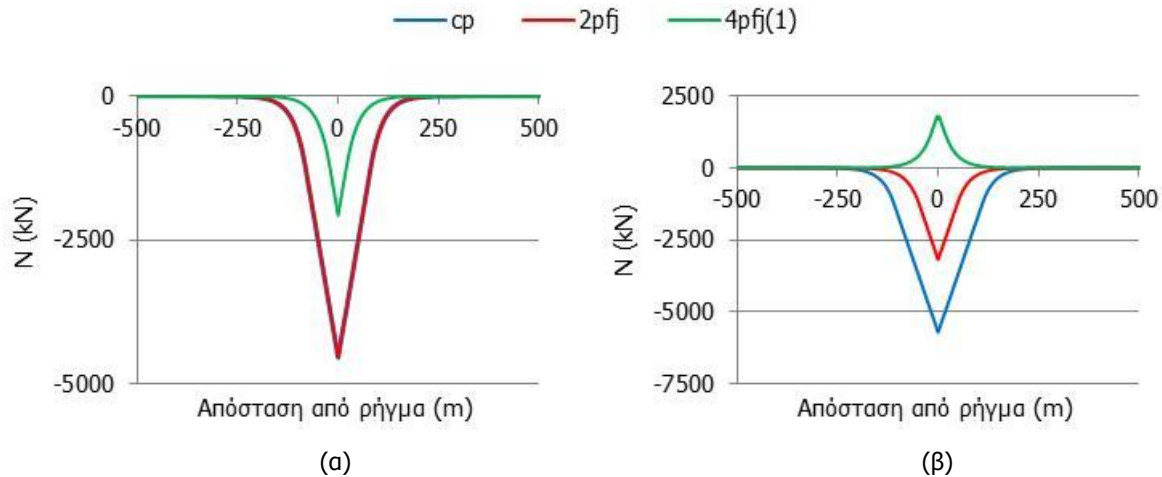
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$
2pfj	3.43	17.41
4pfj(1)	12.57	18.94

Η μετακίνηση ( $y$ ) των αγωγού με εύκαμπτους κόμβους στην περιοχή του ρήγματος προσομοιάζει μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τεθλασμένων γραμμών, ενώ η παραμόρφωση των συνεχών αγωγών είναι μια ομαλή καμπύλη τύπου «S». Στο Σχήμα 3-19 παρατηρείται, επίσης, υπό κλίμακα η μεγάλη στροφή στην οποία υποβάλλονται οι κόμβοι κατά την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος.



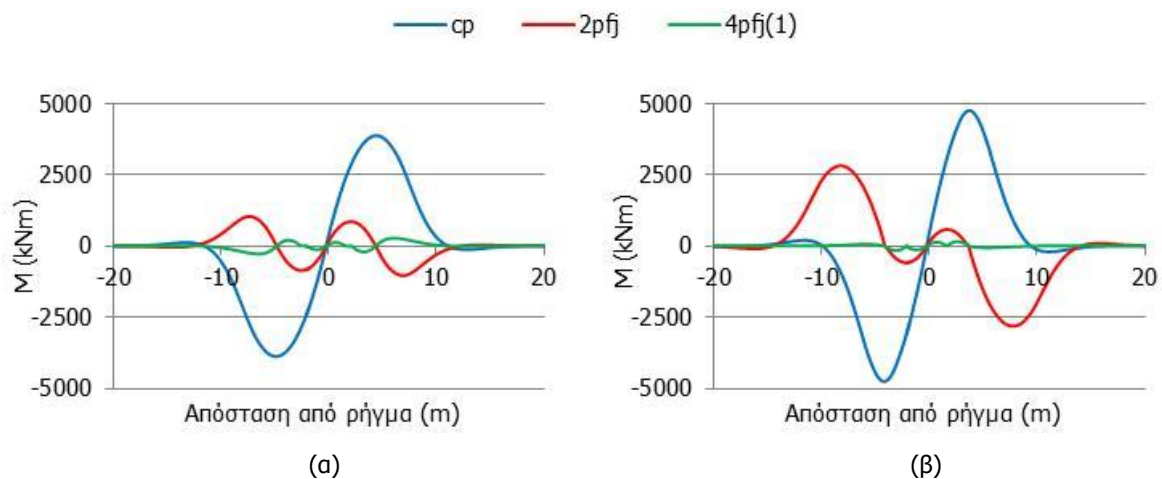
Σχήμα 3-19: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Η χρήση εύκαμπτων κόμβων οδηγεί στην απομείωση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων (N) που αναπτύσσονται κατά μήκος του συνεχούς αγωγού (Σχήμα 3-20). Αξιοσημείωτη είναι η περίπτωση γωνίας  $\beta=100^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  στην οποία η προσθήκη 4 εύκαμπτων κόμβων [4pfj(1)] οδηγεί στην ανάπτυξη εφελκυσμού λόγω της μεγάλης σχετικής στροφής των τμημάτων του αγωγού (Σχήμα 3-19). Τέλος, η προσθήκη 2 εύκαμπτων κόμβων [2pfj] στην περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=0.5\text{m}$  παρατηρείται ότι δεν προκαλεί απομείωση των θλιπτικών δυνάμεων.



Σχήμα 3-20: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Η κατανομή των καμπτικών ροπών (M) κατά μήκος του αγωγού επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την τοποθέτηση εύκαμπτων κόμβων στο συνεχές αγωγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-21. Στον Πίνακα 3-3 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απομείωσή τους σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και προκύπτει ότι η χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)] είναι αποδοτικότερη σε σύγκριση με τη χρήση 2 κόμβων [2pfj]. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγαλύτερων καμπτικών ροπών και τη μειωμένη αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων.

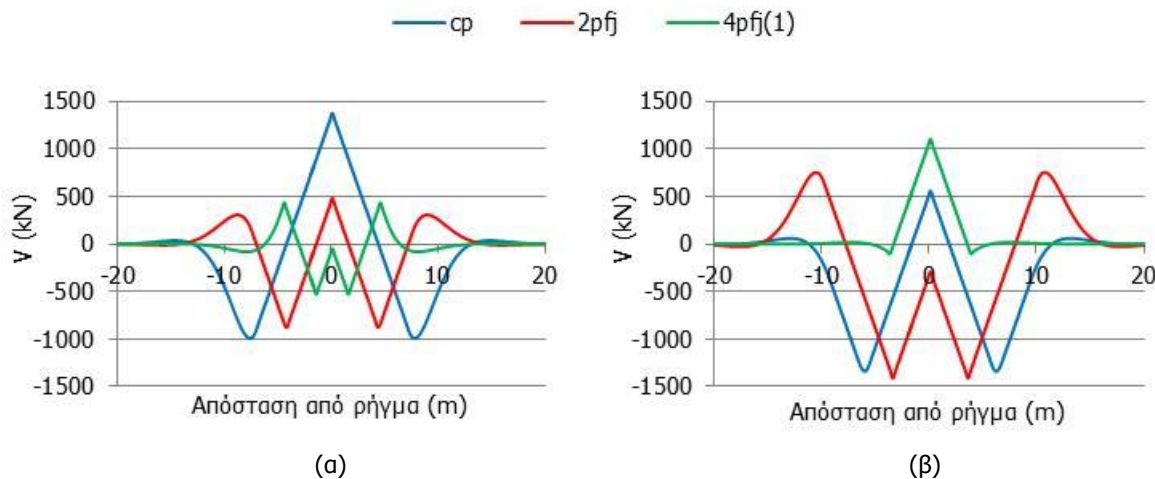


Σχήμα 3-21: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Πίνακας 3-3: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

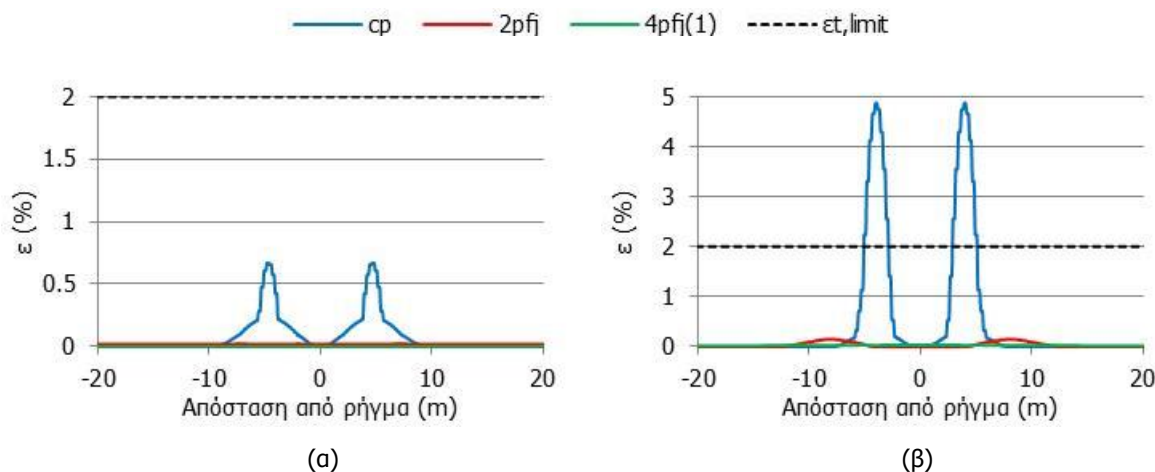
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$
2pfj	73.23	40.81
4pfj(1)	92.85	96.68

Στο Σχήμα 3-22 απεικονίζεται η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού, η οποία τροποποιείται λόγω της προσθήκης εύκαμπτων κόμβων. Η χρήση κόμβων συμβάλλει στη μείωση των αναπτυσσόμενων τεμνουσών δυνάμεων στις περισσότερες περιπτώσεις, με εξαίρεση την περίπτωση επιβαλλόμενης μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  στην οποία η χρήση 2 κόμβων [2pfj] οδηγεί σε μικρή αύξησή τους.



Σχήμα 3-22: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την απομείωση που προκαλούν στις ανηγμένες παραμορφώσεις κατά μήκος του αγωγού. Από το Σχήμα 3-23 και τον Πίνακα 3-4 συμπεραίνεται ότι η χρήση κόμβων είναι άκρως αποτελεσματική και οδηγεί σχεδόν στο μηδενισμό των εφελκυστικών παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ), ακόμα και στην περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  στην οποία ο συνεχής αγωγός υπερβαίνει κατά πολύ το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ).

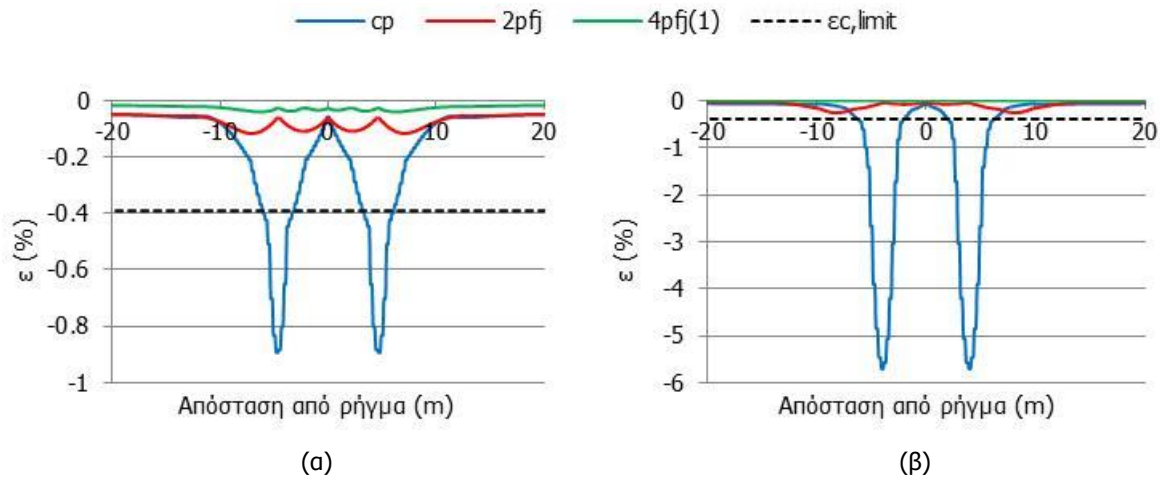


Σχήμα 3-23: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Πίνακας 3-4: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$
2pfj	99.41	97.03
4pfj(1)	100	99.32

Οι θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του συνεχούς αγωγού είναι ιδιαίτερα υψηλές και υπερβαίνουν το αντίστοιχο κανονιστικό όριο ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ), με αποτέλεσμα να είναι έντονος ο κίνδυνος εμφάνισης τοπικού λυγισμού. Παρ' όλα αυτά η χρήση εύκαμπτων κόμβων αποδεικνύεται εξαιρετικά αποδοτική και συμβάλλει δραστικά στην απομείωση των θλιπτικών παραμορφώσεων αρκετά κάτω από το κανονιστικό όριο (Σχήμα 3-24 και Πίνακας 3-5). Επιπλέον, η τοποθέτηση 4 εύκαμπτων κόμβων [4pfj(1)] αποδεικνύεται επιπλέον αποτελεσματική σε σύγκριση με την τοποθέτηση 2 κόμβων [2pfj].

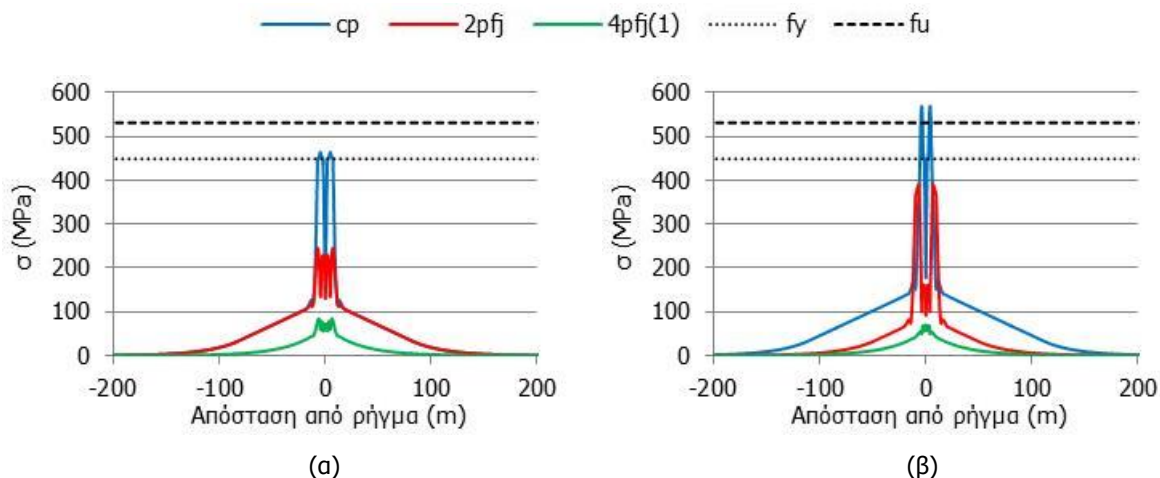


Σχήμα 3-24: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Πίνακας 3-5: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5m$	$\Delta=2.0m$
2pfj	86.97	95.48
4pfj(1)	95.51	100.00

Στο Σχήμα 3-25 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού όταν υπόκειται σε ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων συμβάλλει στη μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων αρκετά κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50MPa$ ) και μάλιστα η περίπτωση [4pfj(1)] αποδεικνύεται αποδοτικότερη.

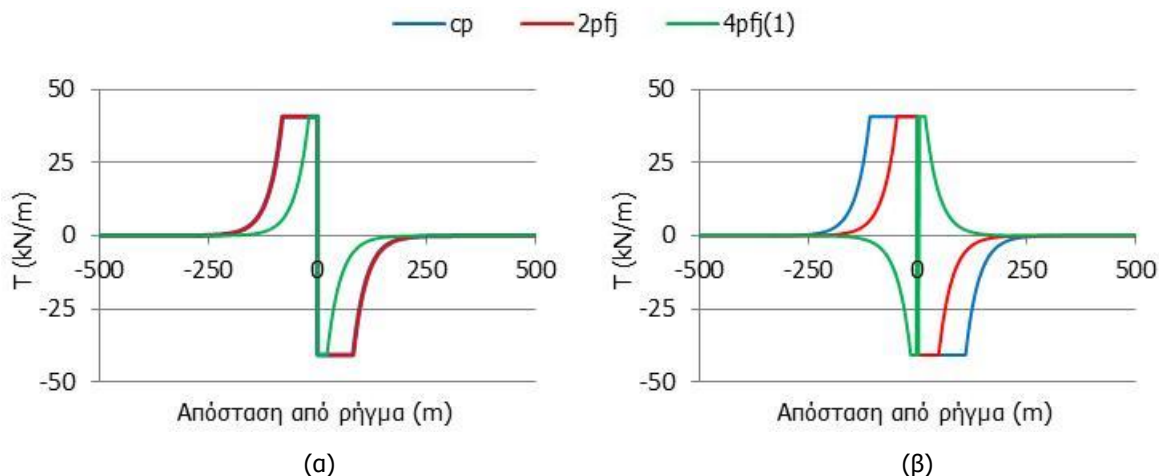


Σχήμα 3-25: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

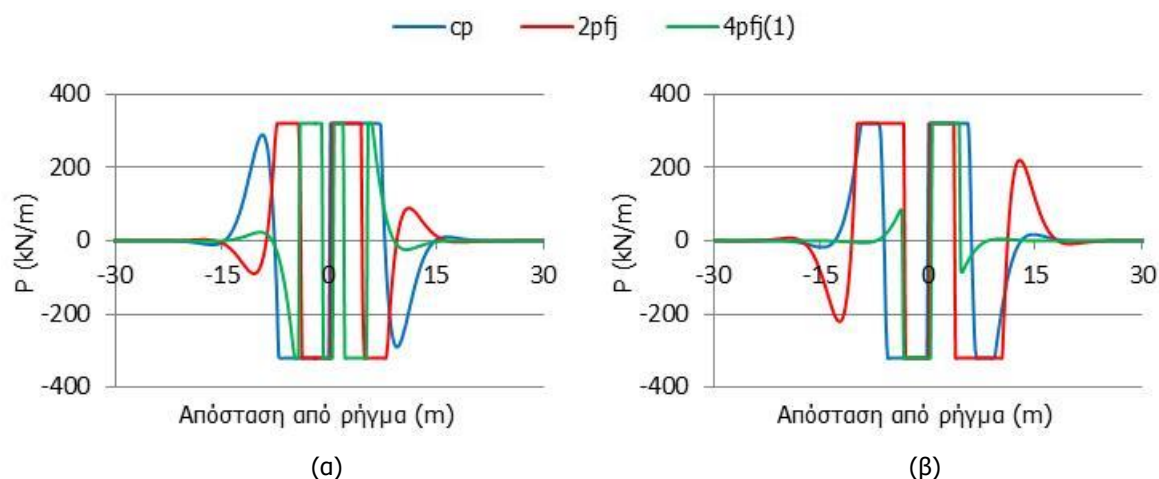
Οι κατανομές των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) και των πλευρικών εγκάρσιων ελατηρίων (P) επηρεάζονται σημαντικά από την τοποθέτηση εύκαμπτων κόμβων στο συνεχές αγωγό,



σύμφωνα με τα Σχήματα 3-26 και 3-27. Το μήκος πλαστικοποίησης του εδάφους ελαττώνεται στις περιπτώσεις με κόμβους και ειδικότερα στην περίπτωση [4pfj(1)] σχεδόν μηδενίζεται. Επίσης, η προσθήκη κόμβων μεταβάλλει την παραμόρφωση του αγωγού στο όρυγμα και άρα επηρεάζει τις εδαφικές δυνάμεις των πλευρικών ελατηρίων, οι οποίες εξαρτώνται από τη μετακίνηση του ρήγματος.



Σχήμα 3-26: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$



Σχήμα 3-27: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

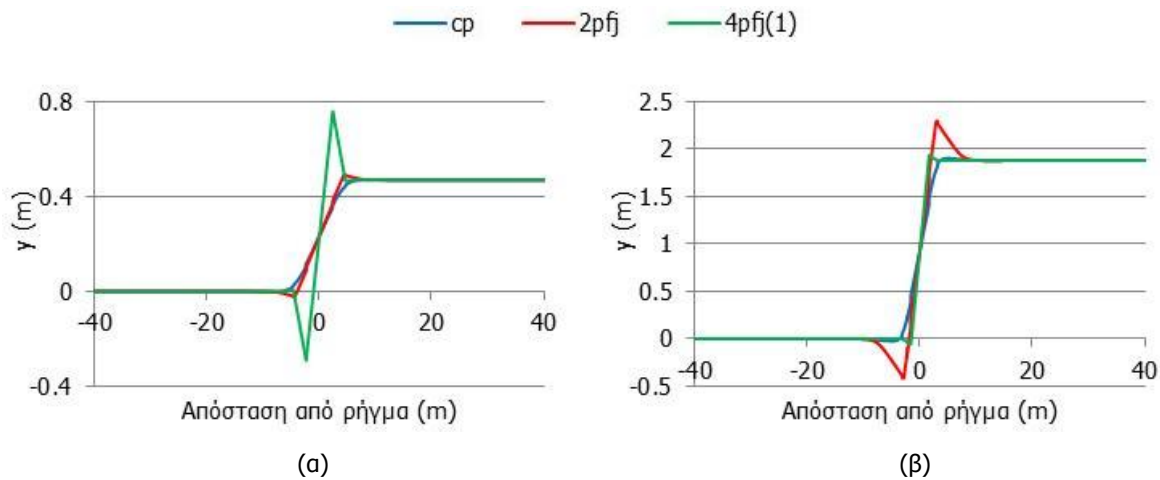
#### 3.4.2.2 Γωνία διασταύρωσης $\beta=110^\circ$

Στα Σχήματα 3-28 έως 3-36 παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό και στους αγωγούς με 2 κόμβους [2pfj] και 4 κόμβους [4pfj] για δύο διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$ . Η απόσταση  $L$ , η οποία προκύπτει με βάση το διάγραμμα καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού (Σχήμα 2-20), στις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται ισούται με: (α) 4.50m και (β) 3.00m, αντίστοιχα. Η μεγαλύτερη στροφή κόμβου στις εξεταζόμενες περιπτώσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-6, παρατηρείται για χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων [4pfj(1)], μετακίνηση  $\Delta=2.0m$  και έχει τιμή  $39.89^\circ$ , κάτι το οποίο θέτει ιδιαίτερες κατασκευαστικές απαιτήσεις.

Πίνακας 3-6: Μέγιστη στροφή εύκαμπτου κόμβου ( $^\circ$ )

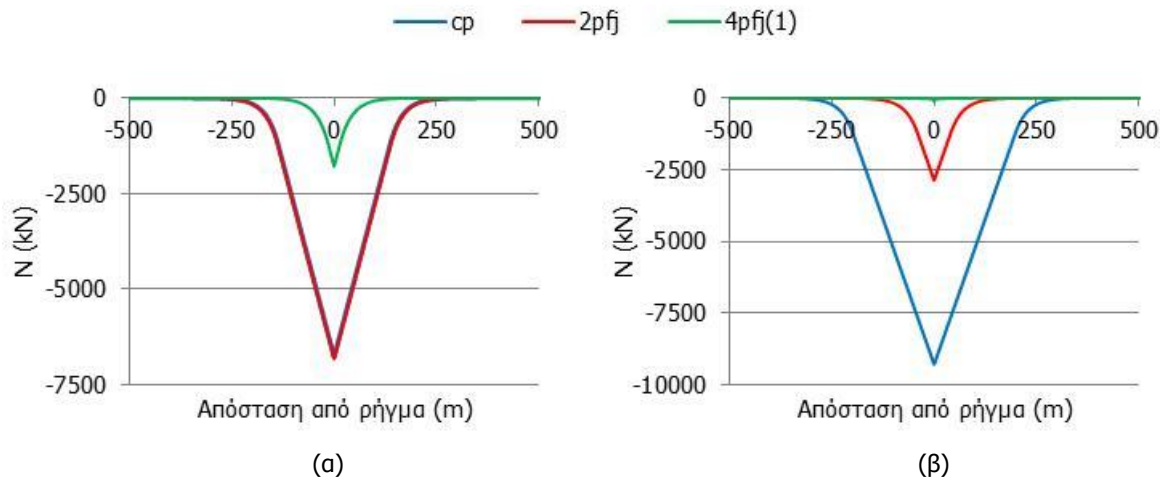
Περίπτωση	$\Delta=0.5m$	$\Delta=2.0m$
2pfj	3.49	30.75
4pfj(1)	20.26	39.89

Στο Σχήμα 3-28 απεικονίζεται η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος και παρατηρείται η έντονη παραμόρφωση των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, καθώς και η μεγάλη στροφή που υφίστανται οι κόμβοι κατά την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος.



Σχήμα 3-28: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

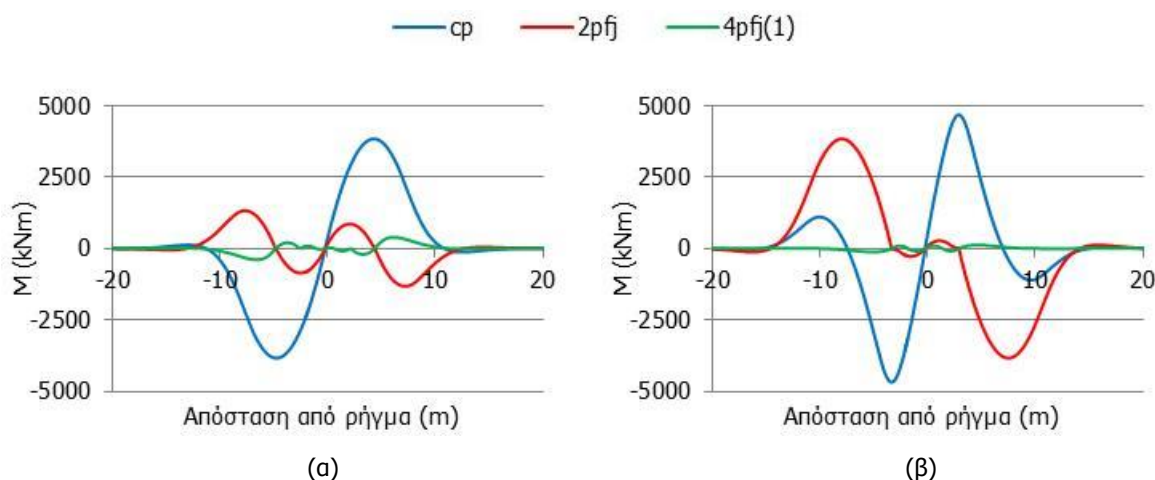
Οι θλιπτικές δυνάμεις ( $N$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του συνεχούς αγωγού μειώνονται λόγω της προσθήκης εύκαμπτων κόμβων, με μόνη εξαίρεση την περίπτωση  $[2pfj]$  για μετακίνηση  $\Delta=0.5\text{m}$  (Σχήμα 3-29). Στην περίπτωση 4 εύκαμπτων κόμβων  $[4pfj(1)]$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  διαπιστώνεται ότι οι αξονικές δυνάμεις του αγωγού σχεδόν μηδενίζονται, ενώ στην παράγραφο 3.4.2.1 και την αντίστοιχη περίπτωση για γωνία  $\beta=100^\circ$  παρατηρείται ότι ο αγωγός υποβάλλεται σε μικρό εφελκυσμό.



Σχήμα 3-29: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Η τοποθέτηση εύκαμπτων κόμβων λειτουργεί ευεργετικά ως προς την απομείωση των καμπτικών ροπών ( $M$ ) κατά μήκος του αγωγού, σύμφωνα με το Σχήμα 3-30 και τον Πίνακα 3-7. Η χρήση 4 κόμβων  $[4pfj(1)]$  αποδεικνύεται αποδοτικότερη και οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση συγκριτικά με τη χρήση 2 κόμβων  $[2pfj]$ . Επιπλέον, στο Σχήμα 3-31 παρουσιάζεται η κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων ( $V$ ) κατά μήκος του αγωγού και προκύπτει ότι η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων συμβάλλει στον περιορισμό τόσο της μέγιστης τιμής τους όσο και του μήκους στο οποίο αναπτύσσονται.

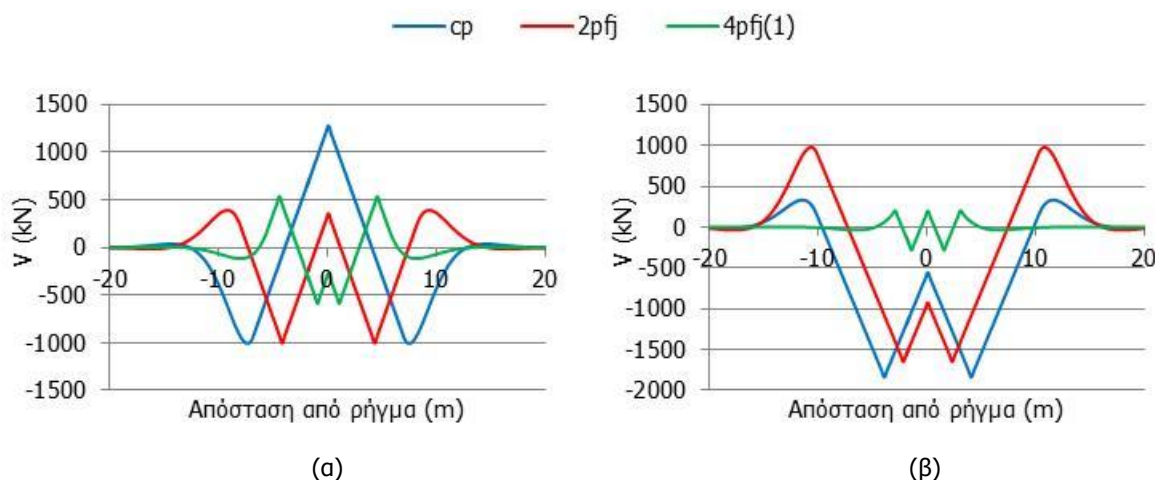




Σχήμα 3-30: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

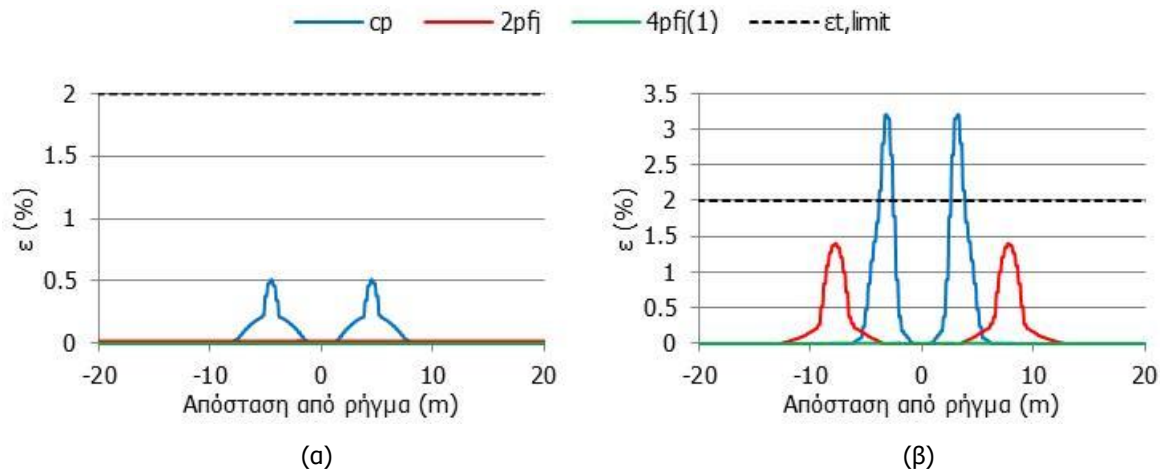
Πίνακας 3-7: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5m$	$\Delta=2.0m$
$2pfj$	65.54	18.05
$4pfj(1)$	89.72	97.37



Σχήμα 3-31: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Στο Σχήμα 3-32 απεικονίζεται η κατανομή των εφελκυστικών διαμήκων παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του αγωγού, ενώ στον Πίνακα 3-8 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απομείωσή τους εξαιτίας της προσθήκης εύκαμπτων κόμβων. Ο κίνδυνος αστοχίας λόγω θραύσης των συγκολλήσεων του αγωγού περιορίζεται με τη χρήση κόμβων καθώς δεν υπερβαίνεται πλέον το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ). Η τοποθέτηση 4 κόμβων [ $4pfj(1)$ ] αποδεικνύεται περισσότερο αποτελεσματική και σχεδόν μηδενίζει τις εφελκυστικές παραμορφώσεις στις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

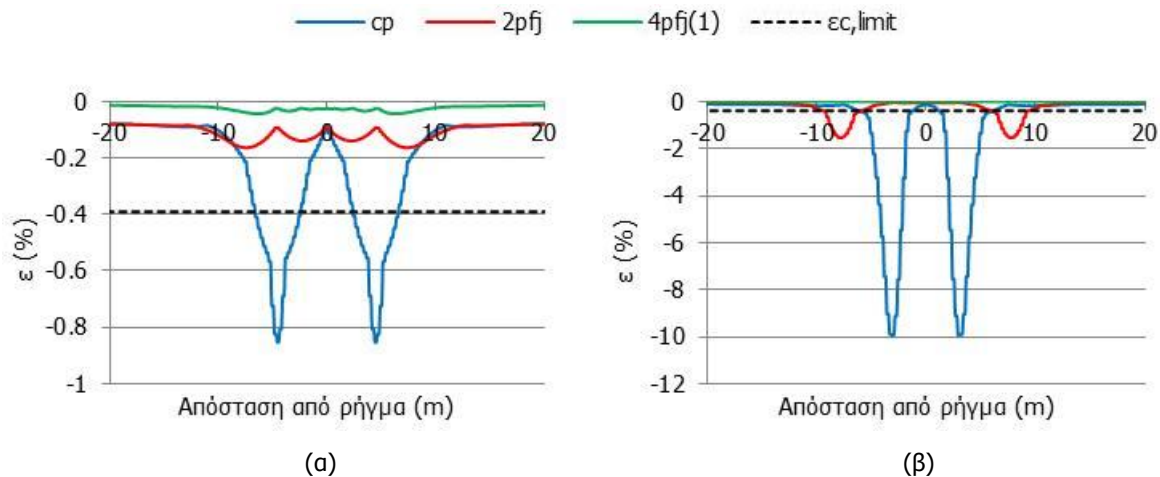


Σχήμα 3-32: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Πίνακας 3-8: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$
2pfj	100.00	56.39
4pfj(1)	100.00	99.79

Οι θλιπτικές παραμορφώσεις ( $\varepsilon$ ) του συνεχούς αγωγού εμφανίζουν πολύ υψηλές τιμές, ιδιαίτερα στην περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$ , και υπερβαίνουν κατά πολύ το κανονιστικό όριο έναντι τοπικού λυγισμού ( $\varepsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ). Η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων συμβάλλει στη σημαντική απομείωση των θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (Σχήμα 3-33 και Πίνακας 3-9) και λειτουργεί υπέρ της ασφαλείας καθώς τις περιορίζει κάτω από το κανονιστικό όριο. Στην περίπτωση [2pfj] και  $\Delta=2.0\text{m}$ , παρόλο που η ποσοστιαία απομείωση είναι εξίσου μεγάλη, οι θλιπτικές παραμορφώσεις εξακολουθούν να υπερβαίνουν το όριο και υπάρχει κίνδυνος αστοχίας από τοπικό λυγισμό.

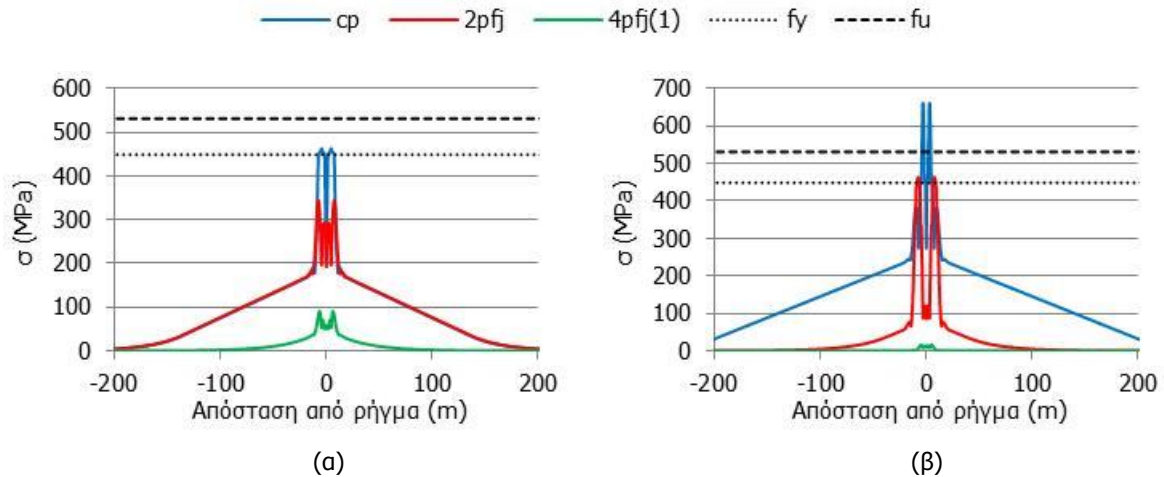


Σχήμα 3-33: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Πίνακας 3-9: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

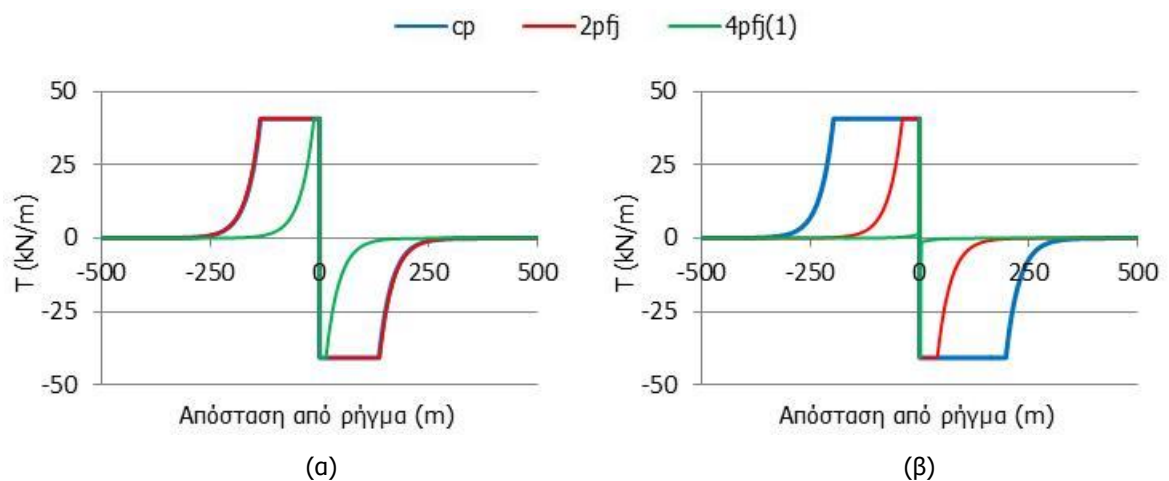
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$
2pfj	80.84	84.50
4pfj(1)	94.95	99.92

Οι εύκαμπτοι κόμβοι συμβάλλουν στη σημαντική μείωση των τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού, όπως προκύπτει από την κατανομή τους στο Σχήμα 3-34. Στην περίπτωση [4pfj(1)] σημειώνεται η μεγαλύτερη απομείωση των τάσεων, των οποίων οι τιμές είναι πολύ μικρότερες του ορίου διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50\text{MPa}$ ).

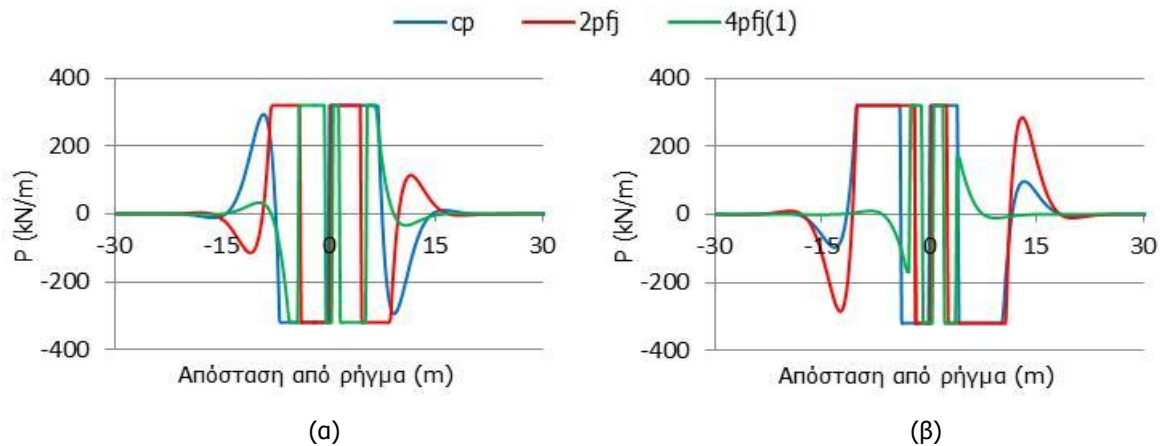


Σχήμα 3-34:Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Το εύρος πλαστικοποίησης του εδάφους ελαττώνεται με την προσθήκη εύκαμπτων κόμβων (Σχήμα 3-35), όπως συμβαίνει και για τη γωνία διασταύρωσης  $\beta=100^\circ$ . Ειδικότερα η χρήση 4 κόμβων [4pfj(1)] σχεδόν μηδενίζει το μήκος του εδάφους που πλαστικοποιείται. Οι δυνάμεις των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων διαφοροποιούνται και εκείνες όταν τοποθετούνται εύκαμπτοι κόμβοι (Σχήμα 3-36), καθώς εξαρτώνται άμεσα από τη μετακίνηση του αγωγού στο όρυγμα και άρα από τη μετακίνηση του ρήγματος.



Σχήμα 3-35: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$



Σχήμα 3-36: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

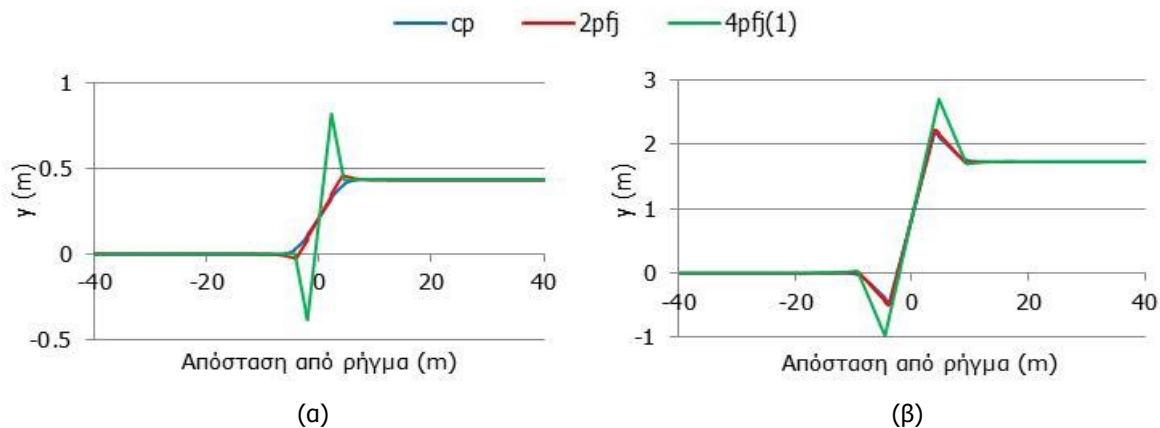
### 3.4.2.3 Γωνία διασταύρωσης $\beta=120^\circ$

Στα Σχήματα 3-37 έως 3-45 παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό και στους αγωγούς με 2 κόμβους [ $2pfj$ ] και 4 κόμβους [ $4pfj(1)$ ] για δύο διαφορετικές τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης: (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$ . Η απόσταση  $L$ , η οποία προκύπτει με βάση το διάγραμμα καμπικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού και τις θέσεις μεγιστοποίησής του (Σχήμα 2-20), στις δύο περιπτώσεις που εξετάζονται ισούται με: (α) 4.25m και (β) 9.25m, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0m$  παρατηρείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο συνεχή αγωγό. Η μεγαλύτερη στροφή κόμβου στις εξεταζόμενες περιπτώσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-10, παρατηρείται για χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων [ $4pfj(1)$ ], μετακίνηση  $\Delta=2.0m$  και έχει τιμή  $35.87^\circ$ .

Πίνακας 3-10: Μέγιστη στροφή εύκαμπτου κόμβου ( $^\circ$ )

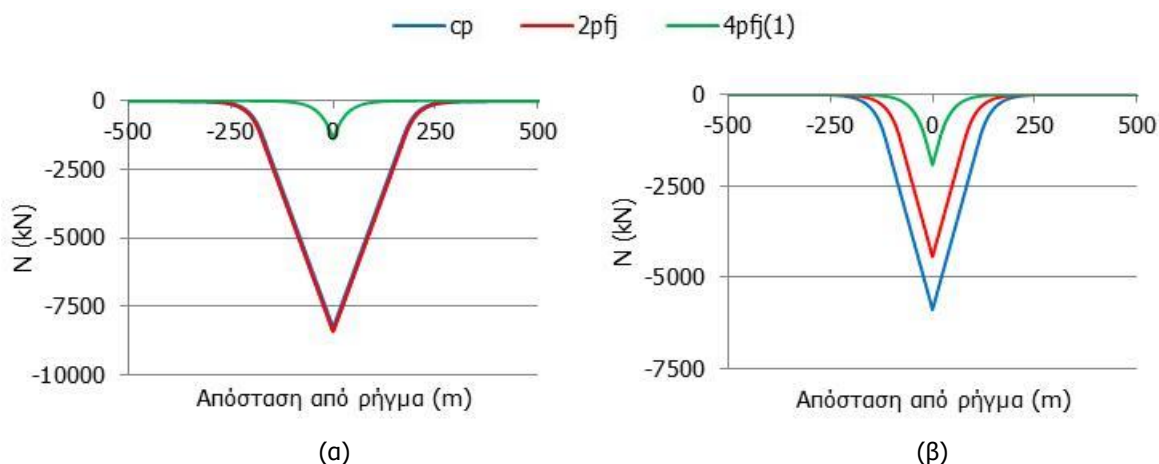
Περίπτωση	$\Delta=0.5m$	$\Delta=2.0m$
$2pfj$	3.54	5.96
$4pfj(1)$	26.33	35.87

Η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-37 και παρατηρείται η μεγάλη στροφή στην οποία υποβάλλονται οι εύκαμπτοι κόμβοι. Η παραμόρφωση των αγωγών με κόμβους μοιάζει με μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τεθλασμένων τμημάτων, ενώ η παραμόρφωση των συνεχών αγωγών είναι μια ομαλή καμπύλη τύπου «S». Επίσης, σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις για μετακίνηση ρήγματος  $\Delta=2.0m$ .



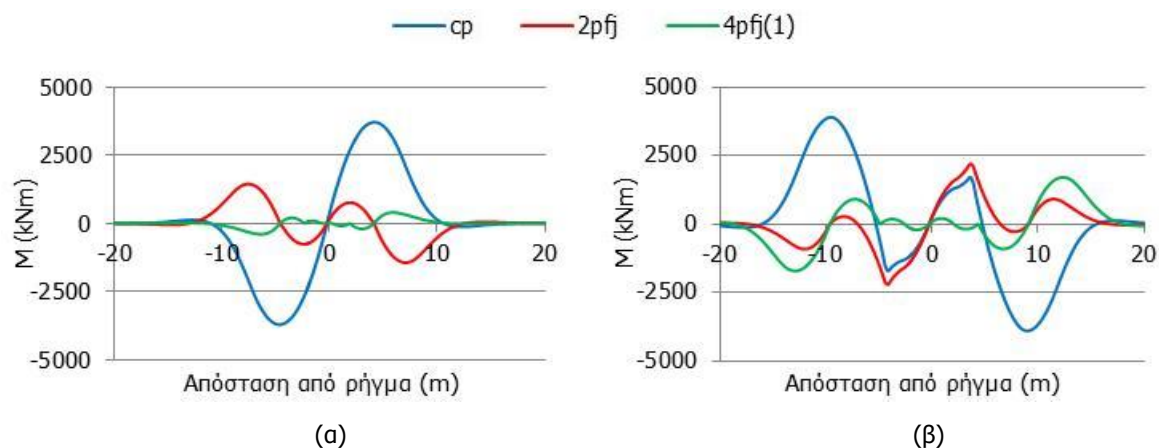
Σχήμα 3-37: Μετακίνηση αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Η προσθήκη των κόμβων οδηγεί σε ελάττωση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων (N) κατά μήκος του αγωγού (Σχήμα 3-38), όπως παρατηρείται και στις υπόλοιπες γωνίες διασταύρωσης που διερευνώνται (ενότητες 3.4.2.1 και 3.4.2.2). Η περίπτωση [4pfj(1)] οδηγεί σε μεγαλύτερη μείωση σε σύγκριση με την περίπτωση [2pfj]. Τέλος, η χρήση 2 κόμβων [2pfj] στην περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=0.5\text{m}$  δεν προκαλεί απομείωση των θλιπτικών δυνάμεων.



Σχήμα 3-38: Κατανομή αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Στο Σχήμα 3-39 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών (M) κατά μήκος του αγωγού και προκύπτει ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων συμβάλλει στη σημαντική ποσοστιαία απομείωσή τους (Πίνακας 3-11). Ακόμα και στην περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  που σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στο συνεχές αγωγό, η τοποθέτηση των κόμβων μεταβάλλει την κατανομή των ροπών και οδηγεί στον περιορισμό τους. Οι 4 κόμβοι [4pfj(1)] αποδεικνύονται αποτελεσματικότεροι σε σύγκριση με τους 2 κόμβους [2pfj] σε όσες περιπτώσεις διερευνώνται. Επιπλέον, η χρήση εύκαμπτων κόμβων, σύμφωνα με το Σχήμα 3-40, παρατηρείται ότι οδηγεί στη μείωση των τεμνουσών δυνάμεων (V) που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού.

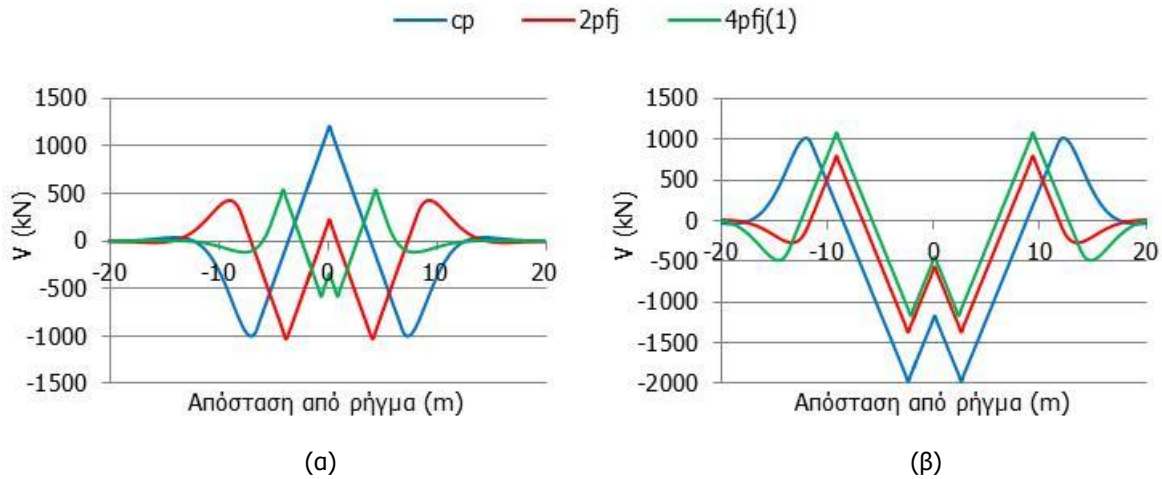


Σχήμα 3-39: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5\text{m}$  και (β)  $\Delta=2.0\text{m}$

Πίνακας 3-11: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

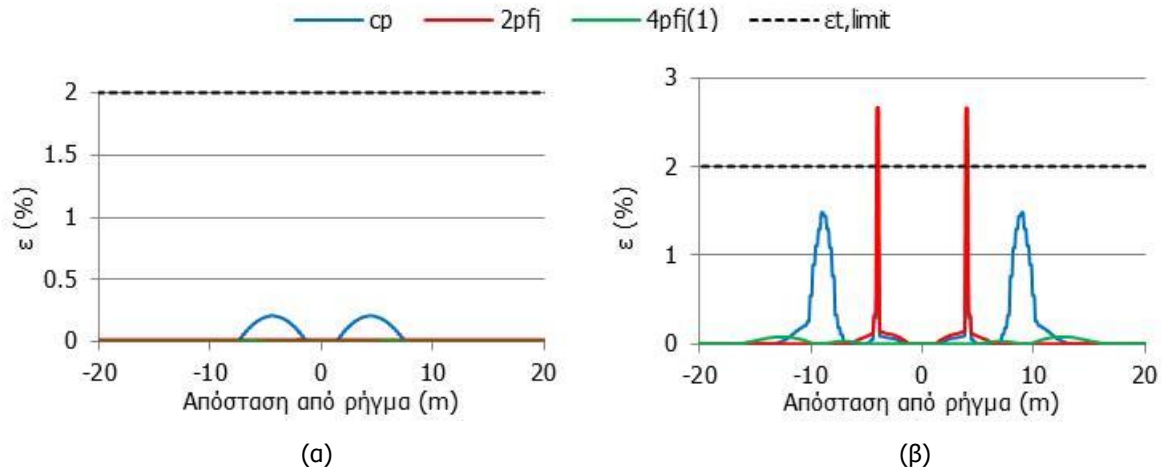
Περίπτωση	$\Delta=0.5\text{m}$	$\Delta=2.0\text{m}$
2pfj	61.16	43.57
4pfj(1)	89.25	56.12





Σχήμα 3-40: Κατανομή τεμνουσών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Οι εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) του συνεχούς αγωγού δεν υπερβαίνουν το αντίστοιχο κανονιστικό όριο ( $\epsilon_{\epsilon,limit}=2\%$ ) και δεν υπάρχει κίνδυνος θραύσης των συγκολλήσεων του (Σχήμα 3-41). Ωστόσο, η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων λειτουργεί υπέρ της ασφαλείας και σχεδόν μηδενίζει τις εφελκυστικές παραμορφώσεις στην περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=0.5m$ . Στην περίπτωση που αστοχεί ο συνεχής αγωγός, δηλαδή για μετακίνηση  $\Delta=2.0m$ , η χρήση 2 κόμβων [ $2pfj$ ] παρατηρείται πως οδηγεί στην αύξησή τους, αλλάζοντας επίσης τη θέση στην οποία μεγιστοποιούνται. Η περίπτωση [ $4pfj(1)$ ] αποδεικνύεται αποτελεσματικότερη και προτιμάται.



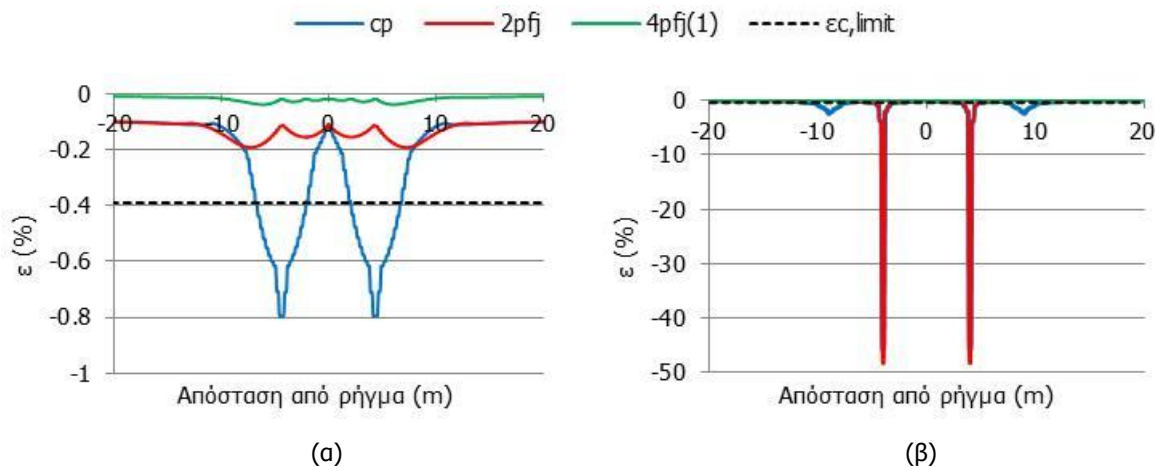
Σχήμα 3-41: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Πίνακας 3-12: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Περίπτωση	$\Delta=0.5m$	$\Delta=2.0m$
$2pfj$	100.00	-
$4pfj(1)$	100.00	94.55

Στο Σχήμα 3-42 παρουσιάζεται η κατανομή των θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του αγωγού, από το οποίο προκύπτει ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων οδηγεί στη σημαντική απομείωσή τους ώστε να μην υπερβαίνεται το κανονιστικό όριο για εμφάνιση τοπικού λυγισμού ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ). Όπως αποδεικνύεται και από τον Πίνακα 3-13, η περίπτωση [ $4pfj(1)$ ] κρίνεται αποτελεσματικότερη και οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσοστιαία ελάττωση των θλιπτικών παραμορφώσεων. Στην περίπτωση μετακίνησης  $\Delta=2.0m$  οι παραμορφώσεις του συνεχούς αγωγού λαμβάνουν εξαιρετικά

υψηλές τιμές και η προσθήκη 2 κόμβων [2rfj] φαίνεται πως συμβάλλει σε μια μικρή αύξησή τους. Αντίθετα, η προσθήκη 4 κόμβων [4rfj(1)] έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία απομείωσή τους.

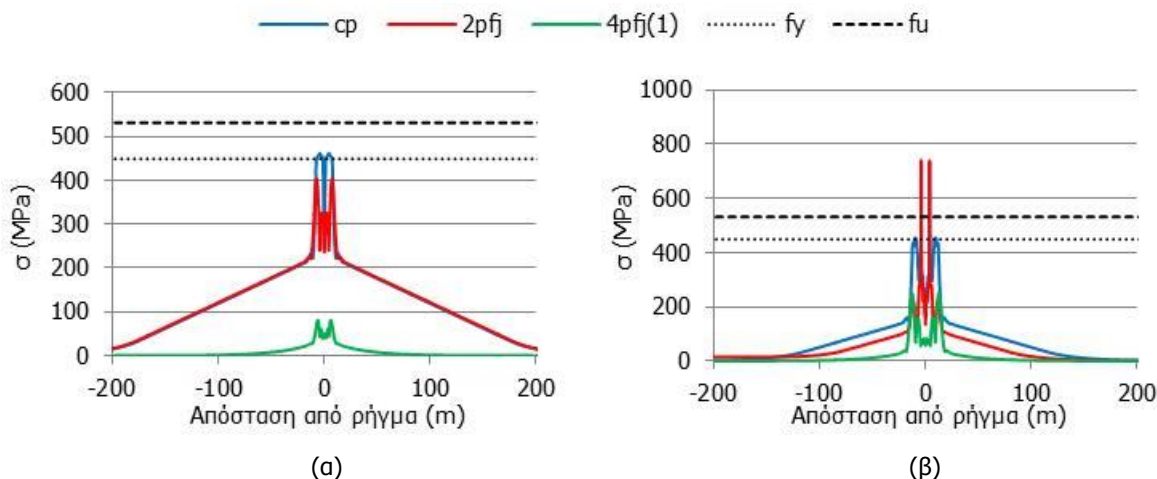


Σχήμα 3-42: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Πίνακας 3-13: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

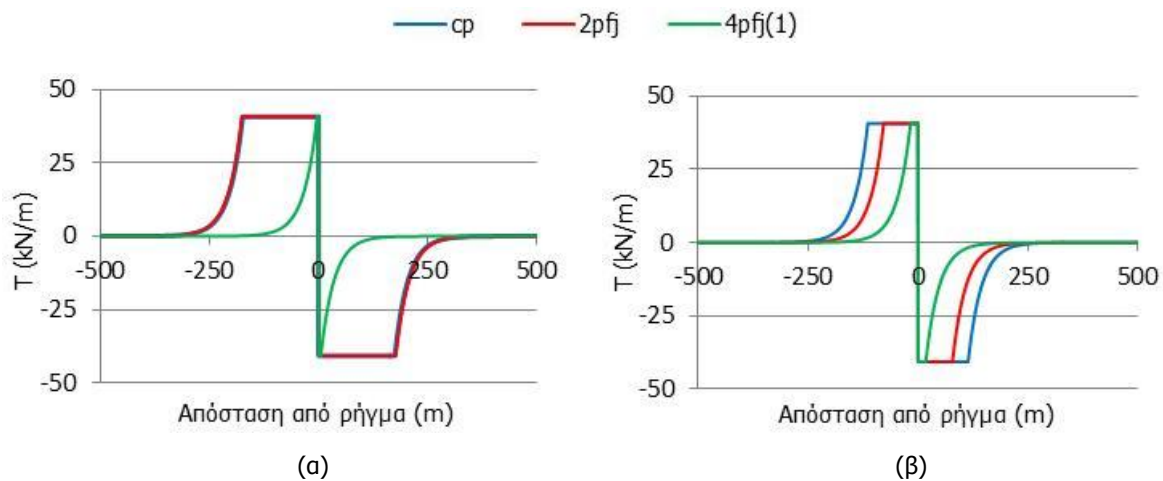
Περίπτωση	$\Delta=0.5m$	$\Delta=2.0m$
2rfj	75.86	-
4rfj(1)	95.17	99.74

Σε ό,τι αφορά την κατανομή των τάσεων ( $\sigma$ ) κατά μήκος του αγωγού (Σχήμα 3-43), η τοποθέτηση κόμβων έχει ως αποτέλεσμα την απομείωσή τους αρκετά κάτω από το όριο διαρροής του χάλυβα ( $f_y=448.50MPa$ ) και η περίπτωση [4rfj(1)] αποδεικνύεται αποδοτικότερη σε σύγκριση με την περίπτωση 2rfj.

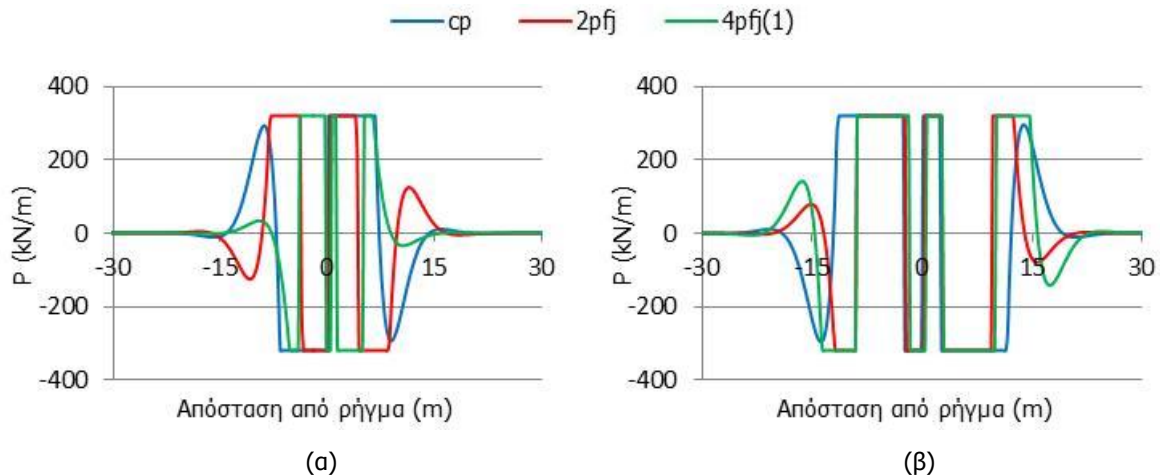


Σχήμα 3-43: Κατανομή τάσεων κατά μήκος του αγωγού για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων στο συνεχή αγωγό μειώνει σε σημαντικό βαθμό το μήκος πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιοχή του ρήγματος, όπως φαίνεται από την κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) στο Σχήμα 3-44. Ειδικότερα στην περίπτωση [4rfj(1)] το μήκος του εδάφους που πλαστικοποιείται σχεδόν μηδενίζεται. Επιπλέον, οι δυνάμεις των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (P) μεταβάλλονται με τη χρήση των κόμβων αφού αλλάζει η παραμόρφωση του αγωγού στο όρυγμα (Σχήμα 3-45).



Σχήμα 3-44: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$



Σχήμα 3-45: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων για επιβαλλόμενη μετακίνηση (α)  $\Delta=0.5m$  και (β)  $\Delta=2.0m$

Στην περίπτωση γωνίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0m$  σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στο συνεχή αγωγό. Για το λόγο αυτό, εκτός από την προσθήκη 2 εύκαμπτων κόμβων σε αποστάσεις  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος (Σχήμα 2-20), δοκιμάζονται δύο ακόμα περιπτώσεις ως προς τη χωροθέτηση των εύκαμπτων κόμβων οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-14 και εξετάζονται ως προς την αποδοτικότητά τους. Οι αποστάσεις εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος που τοποθετούνται οι 2 εύκαμπτοι κόμβοι προκύπτουν από την κατανομή των καμπτικών ροπών ή την παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού, ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση που εξετάζεται.

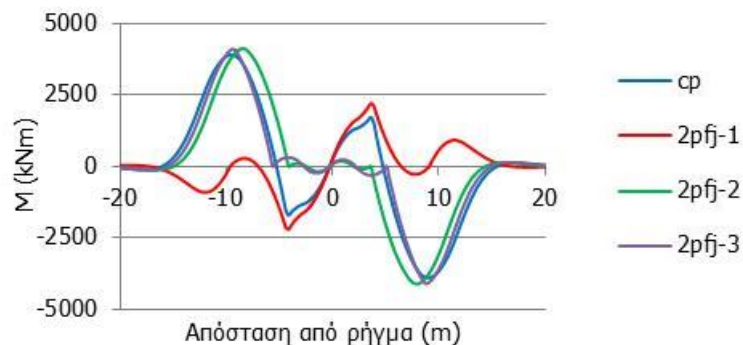
Πίνακας 3-14: Περιπτώσεις ως προς το πλήθος και τη θέση των εύκαμπτων κόμβων για  $\beta=120^\circ$  και  $\Delta=2.0m$

Περίπτωση	Πλήθος κόμβων	Θέσεις κόμβων εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος
$cp$	-	-
$2pfj-1$	2	Θέσεις μεγιστοποίησης των καμπτικών ροπών ( $M$ )
$2pfj-2$	2	Θέσεις μεγιστοποίησης μετακίνησης ( $y$ )
$2pfj-2$	2	Θέσεις μηδενισμού καμπτικών ροπών ( $M$ )

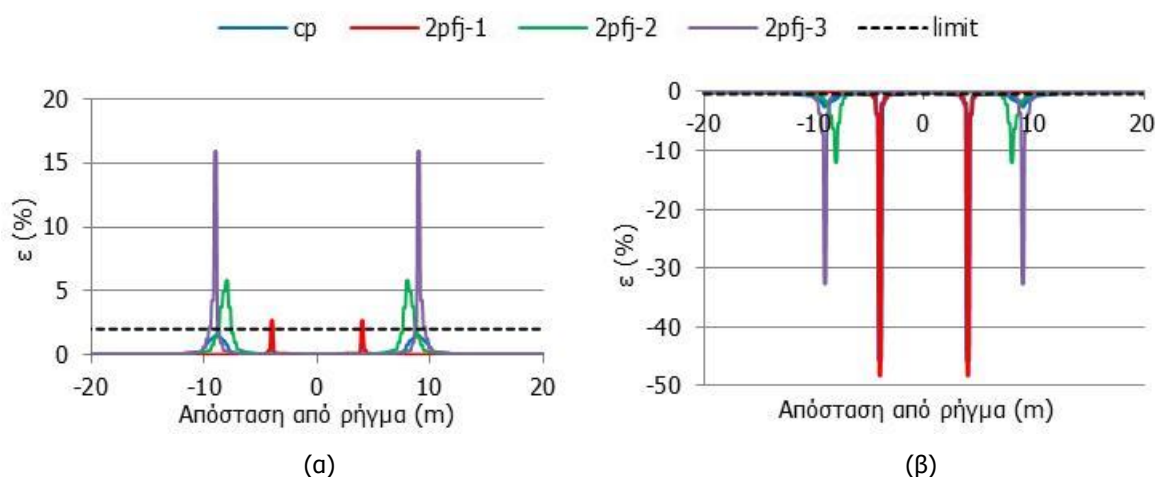
Στο Σχήμα 3-46 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, από την οποία προκύπτει πως η περίπτωση [ $2pfj-1$ ] οδηγεί στη μεγαλύτερη απομείωσή τους. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι κόμβοι έχουν τοποθετηθεί στις θέσεις μεγιστοποίησης των καμπτικών ροπών του συνεχούς αγωγού, εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος. Οι εφελκυστικές και οι θλιπτικές



παραμορφώσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 3-47 και παρατηρείται ότι η προσθήκη 2 κόμβων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων πάνω από το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η περίπτωση [2pfj-2] αποδεικνύεται η αποδοτικότερη ως προς την απομείωση των θλιπτικών παραμορφώσεων, ωστόσο οι τιμές τους εξακολουθούν να είναι ιδιαίτερα υψηλές και υπάρχει έντονος κίνδυνος εμφάνισης τοπικού λυγισμού στο χαλύβδινο αγωγό.



Σχήμα 3-46: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για γωνία  $\beta=120^\circ$  και μετακίνηση  $\Delta=2.0m$



Σχήμα 3-47: Κατανομή (α) εφελκυστικών και (β) θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για γωνία  $\beta=120^\circ$  και μετακίνηση  $\Delta=2.0m$

### 3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκριση ενός υπόγειου χαλύβδινου αγωγού κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται γωνίες διασταύρωσης  $\beta > 90^\circ$ , όπου ο αγωγός υποβάλλεται σε συνδυασμό θλιπτικής και καμπτικής καταπόνησης. Μέσω μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις ώστε να διερευνηθεί η απόκριση τόσο του συνεχούς αγωγού όσο και αγωγών στους οποίους τοποθετούνται εύκαμπτοι κόμβοι. Η προσθήκη των κόμβων έχει ως στόχο την απομείωση των ανηγμένων διαμήκων παραμορφώσεων ώστε να μην υπερβαίνονται τα κανονιστικά όρια που εξασφαλίζουν την ακεραιότητα του χαλύβδινου αγωγού. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με τους κανονισμούς αλλά και την κατασκευαστική πρακτική, προτείνεται η αποφυγή γωνιών διασταύρωσης  $\beta > 90^\circ$  κατά το σχεδιασμό του αγωγού. Πολλές φορές ωστόσο κάτι τέτοιο είναι αναπόφευκτο είτε λόγω περιορισμών κατά την όδευση του αγωγού είτε λόγω αβεβαιοτήτων ως προς τον τρόπο εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης.

Αρχικά, διερευνάται μέσω παραμετρικών αναλύσεων η επιρροή που ασκούν η επιβαλλόμενη μετακίνηση και η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος στην απόκριση του συνεχούς αγωγού. Οι γωνίες που εξετάζονται είναι οι  $\beta=100^\circ$ ,  $\beta=110^\circ$  και  $\beta=120^\circ$ , ενώ οι τιμές της επιβαλλόμενης μετακίνησης κυμαίνονται από  $\Delta=0.5\text{m}$  έως  $\Delta=2.0\text{m}$ . Επειδή η γωνία  $\beta>90^\circ$  είναι ανεπιθύμητη κατά το σχεδιασμό, κρίνεται ότι η διερεύνηση μεγαλύτερων γωνιών διασταύρωσης και μεγαλύτερων μετακινήσεων δεν έχει πρακτικό νόημα. Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης, ανεξάρτητα από την τιμή της γωνίας διασταύρωσης, αποδεικνύεται πως οδηγεί σε αύξηση των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών. Σε πολλές περιπτώσεις οι εφελκυστικές και κυρίως οι θλιπτικές παραμορφώσεις κατά μήκος του συνεχούς αγωγού υπερβαίνουν τα αντίστοιχα κανονιστικά όρια, με αποτέλεσμα να είναι έντονος ο κίνδυνος θραύσης των συγκολλήσεων του αγωγού και ο κίνδυνος τοπικού λυγισμού. Επιπλέον, η αύξηση της μετακίνησης συμβάλλει στην αύξηση των αξονικών θλιπτικών δυνάμεων, των καμπτικών ροπών, των αναπτυσσόμενων τάσεων αλλά και του μήκους πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιοχή του ρήγματος. Αντίστοιχα, διατηρώντας σταθερή την τιμή της μετακίνησης, η αύξηση της γωνίας του ρήγματος έχει ως συνέπεια την αύξηση των θλιπτικών διαμήκων παραμορφώσεων, αυξάνοντας τον κίνδυνο εκδήλωσης τοπικού λυγισμού. Αυξάνονται επίσης οι θλιπτικές δυνάμεις, οι αναπτυσσόμενες τάσεις και το μήκος πλαστικοποίησης του εδάφους, ενώ παρατηρείται μια μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις εξαίρεση αποτελούν οι περιπτώσεις γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta\geq 1.5\text{m}$  στις οποίες σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στο συνεχή αγωγό και διαπιστώνεται απομείωση των εντατικών μεγεθών και ραγδαία αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά μήκος του.

Η κατανομή των καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού αποτελεί τη βάση για τη χωροθέτηση των εύκαμπτων κόμβων. Οι θέσεις μεγιστοποίησης των καμπτικών ροπών θεωρείται ότι απέχουν απόσταση  $L$  από το ίχνος του ρήγματος (Σχήμα 2-20). Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η αποδοτικότητα αγωγών με 2 κόμβους σε αποστάσεις  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος [ $2rfj$ ] και αγωγών με 4 κόμβους σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος [ $4rfj(1)$ ]. Η συμπεριφορά αγωγών με εύκαμπτους κόμβους για γωνίες διασταύρωσης  $\beta>90^\circ$  διαφέρει από τη συμπεριφορά αγωγών που υπόκεινται σε συνδυασμό καμπτικής και εφελκυστικής καταπόνησης ( $\beta\leq 90^\circ$ ). Η χρήση εύκαμπτων κόμβων συμβάλλει στη μείωση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων κατά μήκος του αγωγού, και μάλιστα στην περίπτωση γωνίας  $\beta=100^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  με τη χρήση 4 κόμβων [ $4rfj(1)$ ] εκδηλώνεται μικρή εφελκυστική ένταση στον αγωγό. Παράλληλα, η τοποθέτηση των εύκαμπτων κόμβων οδηγεί σε σημαντική απομείωση των καμπτικών ροπών και των αναπτυσσόμενων τάσεων και κρίνεται ως ιδιαίτερα αποδοτική καθώς περιορίζει τις εφελκυστικές και θλιπτικές παραμορφώσεις εντός των αντίστοιχων κανονιστικών ορίων, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο αστοχίας του αγωγού είτε λόγω θραύσης των συγκολλήσεων του είτε λόγω τοπικού λυγισμού. Αποδεικνύεται ότι η χρήση 4 κόμβων [ $4rfj(1)$ ] είναι αποτελεσματικότερη σε σύγκριση με τη χρήση 2 κόμβων [ $2rfj$ ] και οδηγεί σε σημαντικότερη ποσοστιαία απομείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων. Ακόμη και στην περίπτωση γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta=2.0\text{m}$  που παρατηρείται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στο συνεχή αγωγό και οι θλιπτικές παραμορφώσεις εμφανίζουν υπερβολικά υψηλές τιμές, η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων φαίνεται πως ασκεί μεγάλη επιρροή στην απόκρισή του. Τέλος, σε αντίθεση με τη χρήση εύκαμπτων κόμβων σε αγωγούς που διασταυρώνονται με το σεισμικό ρήγμα υπό γωνία  $\beta\leq 90^\circ$ , η μέγιστη στροφή των κόμβων για γωνίες  $\beta>90^\circ$  είναι πολύ μεγαλύτερη και αυτό θέτει ιδιαίτερες κατασκευαστικές απαιτήσεις για τους κόμβους. Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, παρόλου που οι γωνίες διασταύρωσης  $\beta\geq 90^\circ$  είναι συνήθως ανεπιθύμητες κατά το σχεδιασμό του χαλύβδινου αγωγού.

# 4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΚΟΜΒΩΝ

## 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η διερεύνηση του βέλτιστου αριθμού και της βέλτιστης χωροθέτησης των εύκαμπτων κόμβων πραγματοποιείται στα Κεφάλαια 2 και 3 βάσει της γωνίας διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος. Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται παραμετρικά η επιρροή της διαμέτρου, του πάχους τοιχώματος και του βάθους ταφής του αγωγού στην αποδοτικότητα των κόμβων κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, αρχικά μελετάται ο συνεχής αγωγός [cp] και το διάγραμμα των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται σε αυτόν αποτελεί τη βάση για την τοποθέτηση 4 εύκαμπτων κόμβων [4pfj]. Αν θεωρηθεί ότι τα σημεία του συνεχούς αγωγού στα οποία μεγιστοποιούνται οι καμπτικές ροπές απέχουν απόσταση  $L$  από το ρήγμα, τότε οι 4 κόμβοι τοποθετούνται σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος. Σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο παρόν κεφάλαιο, η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος είναι  $\beta=70^\circ$  και η μετακίνηση του ρήγματος που επιβάλλεται στον αγωγό ισούται με  $\Delta=1.0m$ .

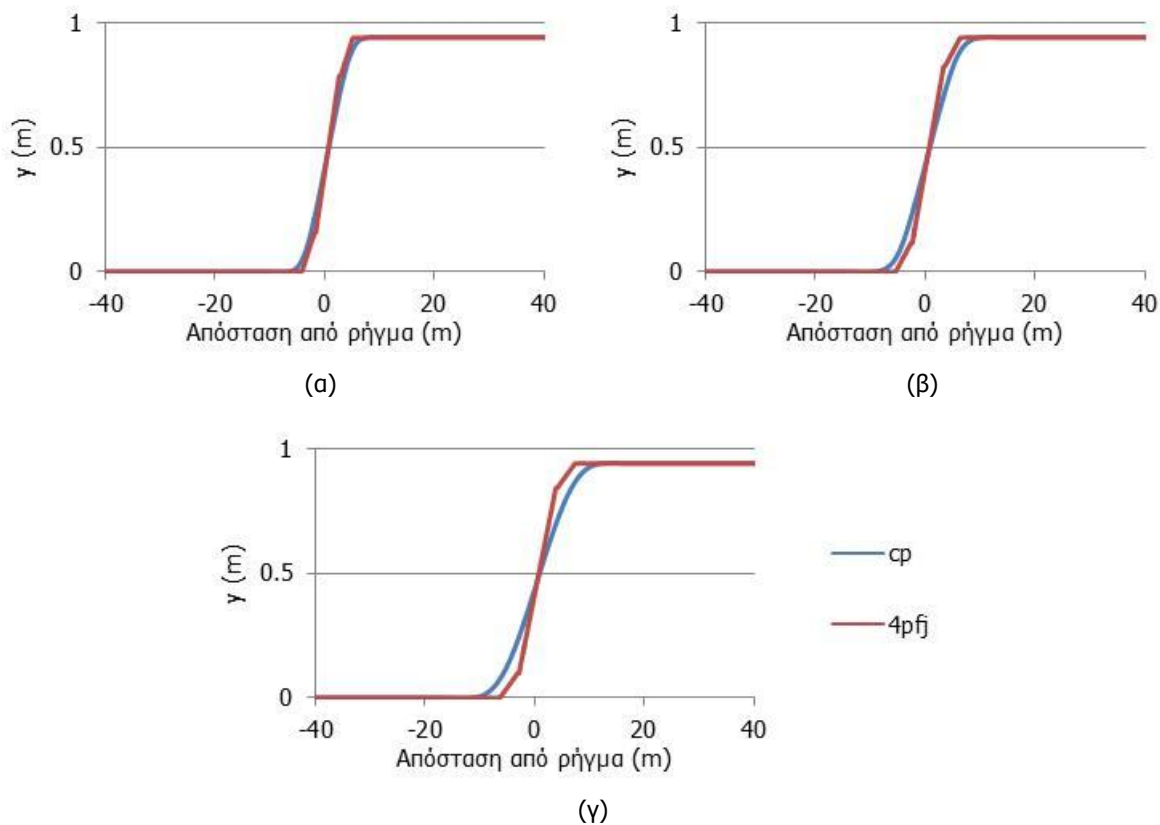
## 4.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

### 4.2.1 Μεταβολή του λόγου $D/t$

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του χαλύβδινου αγωγού καθορίζονται από μη-σεισμικές παραμέτρους και κυρίως από τις συνθήκες λειτουργίας του, π.χ. ποσότητα μεταφερόμενου καυσίμου, πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας, προστασία έναντι διάβρωσης, κλπ.. Παρ' όλα αυτά, ο λόγος της διαμέτρου προς το πάχος τοιχώματος ( $D/t$ ) παίζει καθοριστικό ρόλο στην τοπική και καθολική ευστάθεια του αγωγού, έναντι φαινομένων λυγισμού, καθώς καθορίζει τη λυγηρότητά του. Συγκεκριμένα, αγωγοί με χαμηλό λόγο  $D/t$  που βρίσκονται θαμμένοι σε μικρό βάθος και καταπονούνται θλιπτικά κινδυνεύουν από την εμφάνιση καθολικού λυγισμού, ενώ αγωγοί θαμμένοι σε μεγαλύτερο βάθος και με μεγάλο λόγο  $D/t$  είναι επιρρεπείς σε αστοχία από τοπικό λυγισμό [24].

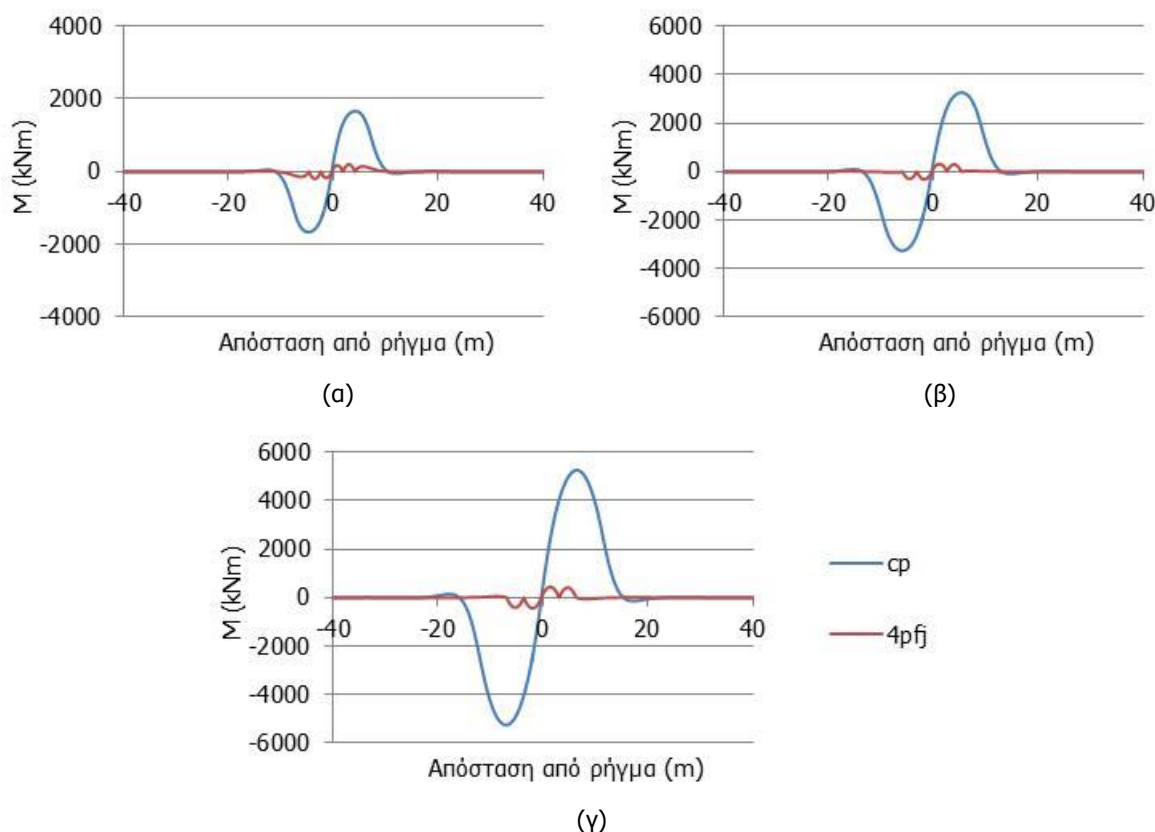
Στην ενότητα αυτή μελετάται η επίδραση του λόγου της διαμέτρου του αγωγού ( $D$ ) προς το πάχος του τοιχώματός του ( $t$ ) στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται αναλύσεις σε αγωγό διαμέτρου  $D=0.914\text{m}$  και πάχους τοιχώματος (α)  $t=7.92\text{mm}$ , (β)  $t=12.70\text{mm}$  και (γ)  $t=19.05\text{mm}$ . Οι λόγοι  $D/t$  για τις περιπτώσεις που εξετάζονται ισούνται αντίστοιχα με (α)  $D/t=115.40$ , (β)  $D/t=71.97$  και (γ)  $D/t=47.98$ , ενώ σημειώνεται πως οι τιμές της διαμέτρου και του πάχους τοιχώματος που χρησιμοποιούνται είναι εμπορικές. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων παρέχει ταυτόχρονα και συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του πάχους τοιχώματος ( $t$ ) στην απόκριση του αγωγού κατά την ενεργοποίηση του σεισμικού ρήγματος.

Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται η μετακίνηση ( $y$ ) του συνεχούς αγωγού και του αγωγού με 4 εύκαμπτους κόμβους, από το οποίο προκύπτει ότι το συνολικό μήκος του αγωγού που καμπυλώνεται αυξάνεται όσο αυξάνεται το πάχος ( $t$ ) του τοιχώματός του. Η παραμόρφωση του αγωγού με 4 εύκαμπτους κόμβους προσομοιάζει μία αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τμημάτων, λόγω της λειτουργίας του κόμβου ως εσωτερικής άρθρωσης στο συνεχές σύστημα.



Σχήμα 4-1: Μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για (α)  $D/t=115.40$ , (β)  $D/t=71.97$  και (γ)  $D/t=47.98$

Η αύξηση του πάχους τοιχώματος ( $t$ ) οδηγεί στην αύξηση των καμπτικών ροπών ( $M$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού, σύμφωνα με το Σχήμα 4-2, λόγω αύξησης της δυσκαμψίας της διατομής. Η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων συμβάλλει στη μεγάλη ποσοστιαία απομείωση των καμπτικών ροπών των συνεχών αγωγών (Πίνακας 4-1), ανεξαρτήτως του λόγου  $D/t$ .

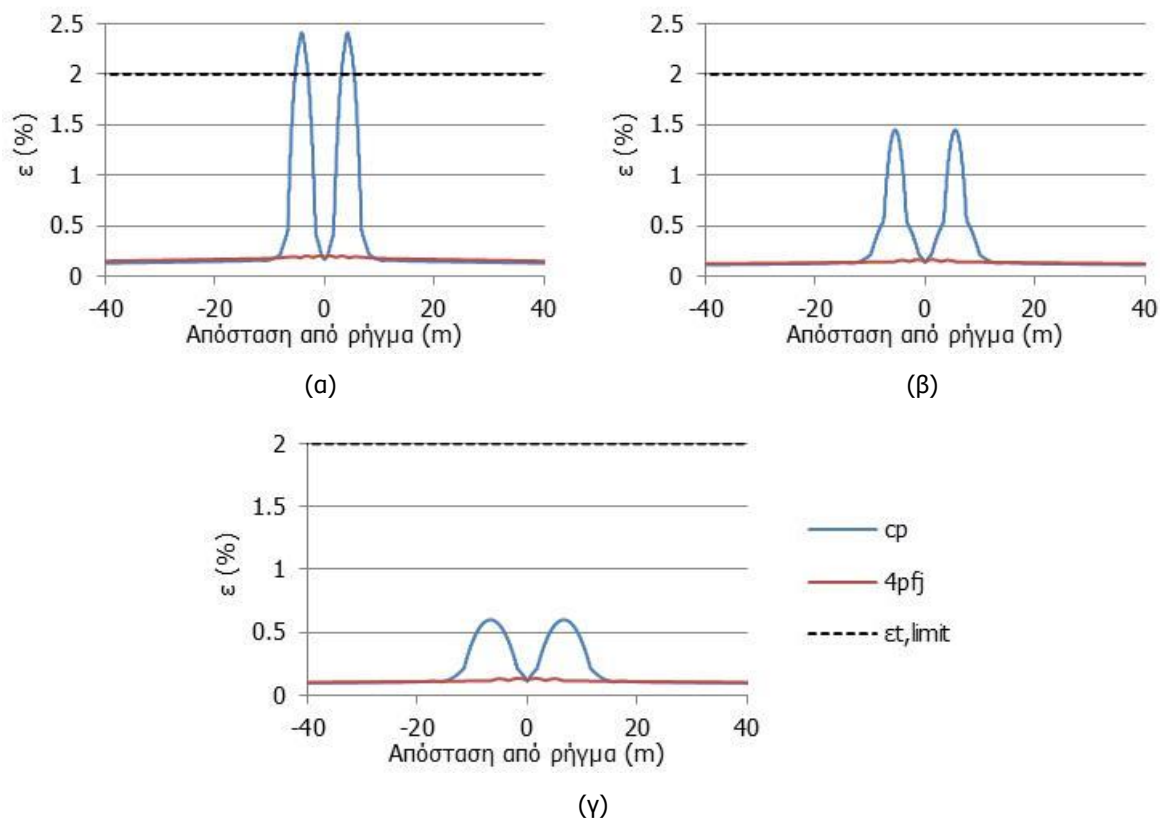


Σχήμα 4-2: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για (α)  $D/t=115.40$ , (β)  $D/t=71.97$  και (γ)  $D/t=47.98$

Πίνακας 4-1: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

Λόγος $D/t$	Ποσοστό μείωσης (%)
115.40	88.27
71.97	90.22
47.98	91.62

Οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού απομειώνονται σημαντικά με την αύξηση του πάχους ( $t$ ) του τοιχώματός του (Σχήμα 4-3). Μόνο στην περίπτωση  $D/t=115.40$  οι εφελκυστικές παραμορφώσεις του συνεχούς αγωγού υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο έναντι θραύσης των συγκολλήσεων του ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ). Η χρήση, ωστόσο, 4 εύκαμπτων κόμβων οδηγεί σε μεγάλη ποσοστιαία μείωση των παραμορφώσεων σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις (Πίνακας 4-2), ανεξάρτητα από το λόγο  $D/t$ , χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπέρβασης του κανονιστικού ορίου. Το ποσοστό μείωσης είναι μικρότερο όσο αυξάνεται το πάχος τοιχώματος ( $t$ ), αρκετά μικρότερες όμως είναι και οι εφελκυστικές παραμορφώσεις κατά μήκος του αντίστοιχου συνεχούς αγωγού. Πρακτικά, διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη επιρροή του λόγου  $D/t$  στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων σε όρους μείωσης των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών παραμορφώσεων.

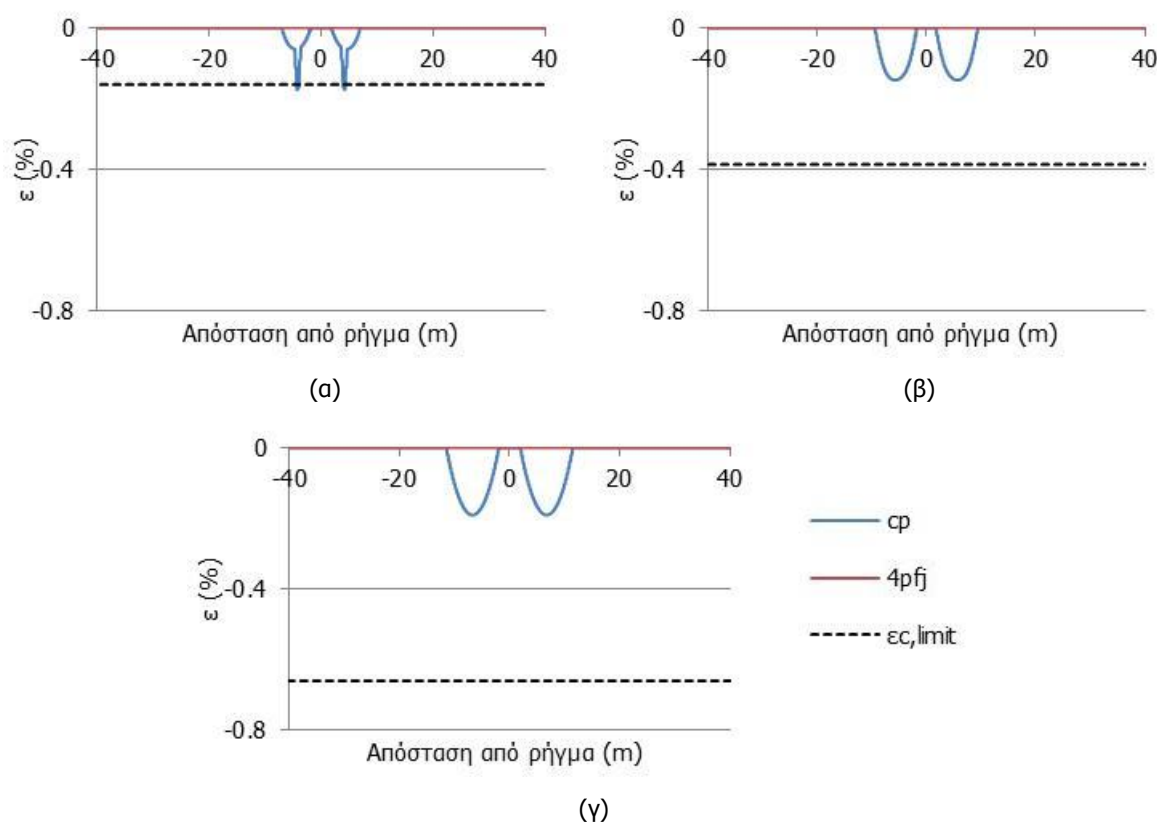


Σχήμα 4-3: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για (α)  $D/t=115.40$ , (β)  $D/t=71.97$  και (γ)  $D/t=47.98$

Πίνακας 4-2: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Λόγος $D/t$	Ποσοστό μείωσης (%)
115.40	91.66
71.97	88.77
47.98	77.58

Οι θλιπτικές παραμορφώσεις ( $\varepsilon$ ) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους παρά τη μεταβολή του πάχους τοιχώματος ( $t$ ), το οποίο οφείλεται στην καμπτική και κυρίως εφελκυστική καταπόνηση του αγωγού δεδομένης της γωνίας διασταύρωσης  $\beta=70^\circ$ . Η αύξηση όμως του πάχους τοιχώματος, για δεδομένη διάμετρο ( $D$ ) του αγωγού, οδηγεί σε αύξηση του κανονιστικού ορίου σύμφωνα με την εξίσωση (1-2) και επομένως σε ελάττωση του κινδύνου για εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Το κανονιστικό όριο  $\varepsilon_{c,limit}$  στις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται ισούται, αντίστοιχα, με: (α)  $-0.16\%$  (β)  $-0.39\%$  και (γ)  $-0.66\%$ . Επίσης, από το Σχήμα 4-4 και τον Πίνακα 4-3 προκύπτει ότι η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων σχεδόν μηδενίζει τις θλιπτικές παραμορφώσεις, ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου  $D/t$ .



Σχήμα 4-4: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για (α)  $D/t=115.40$ , (β)  $D/t=71.97$  και (γ)  $D/t=47.98$

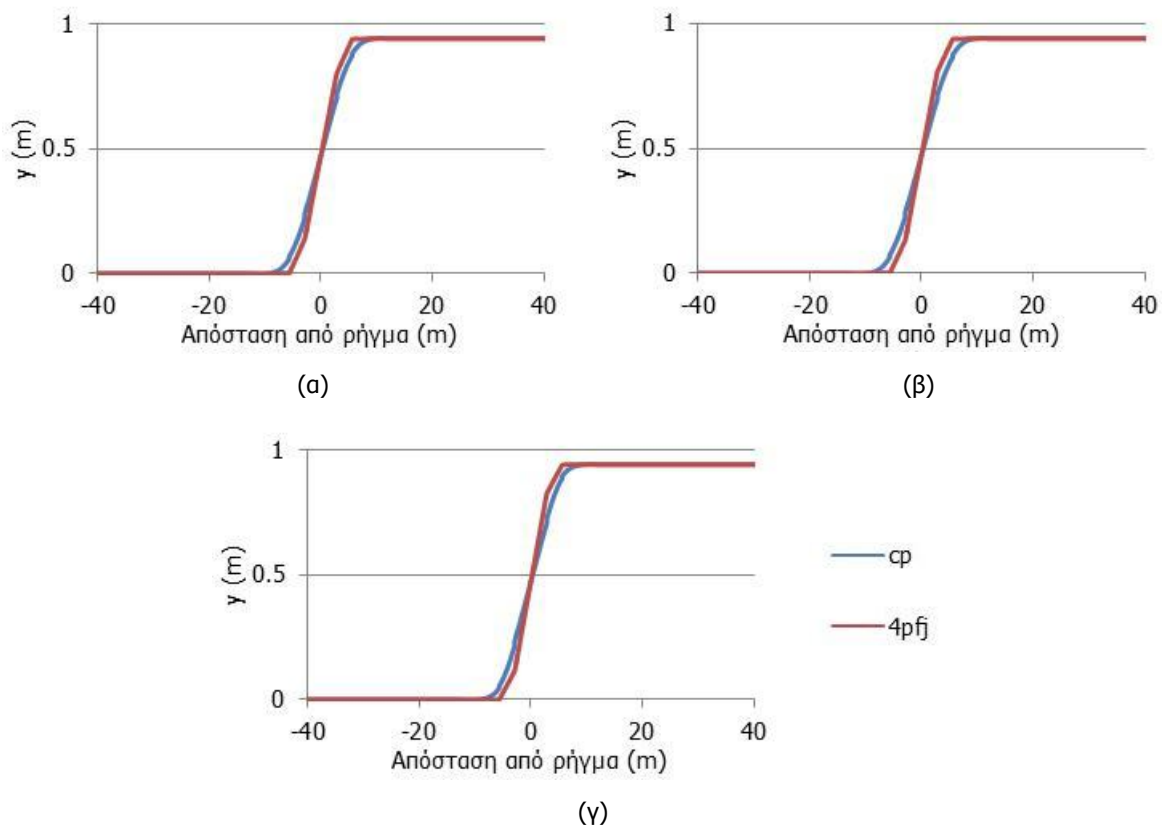
Πίνακας 4-3: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Λόγος $D/t$	Ποσοστό μείωσης (%)
115.40	100.00
71.97	100.00
47.98	100.00

#### 4.2.2 Σταθερό γινόμενο $D \times t$

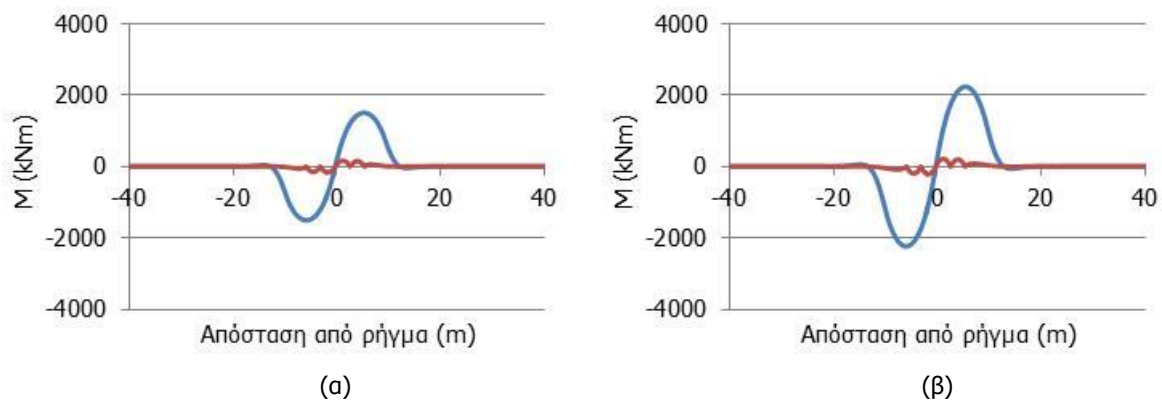
Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επιρροή του λόγου  $D/t$  στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων μία δεύτερη προσέγγιση αποτελεί η διατήρηση σταθερού του γινομένου της διαμέτρου ( $D$ ) του αγωγού με το πάχος του τοιχώματός του ( $t$ ). Η προσπάθεια να διατηρηθεί σταθερό το γινόμενο  $D \times t$  οδηγεί σε αύξηση της διαμέτρου και ταυτόχρονη μείωση του πάχους τοιχώματος και αντιστρόφως. Στη συγκεκριμένη ενότητα εξετάζονται τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί διαμέτρου ( $D$ ) και πάχους τοιχώματος ( $t$ ) οι οποίοι έχουν το ίδιο γινόμενο: (α)  $D=0.457\text{m}$ ,  $t=25.40\text{mm}$ , (β)  $D=0.610\text{m}$ ,  $t=19.03\text{mm}$  και (γ)  $D=0.914\text{m}$ ,  $t=12.70\text{mm}$ . Οι τιμές της διαμέτρου ( $D$ ) που χρησιμοποιούνται είναι εμπορικές, ενώ οι τιμές του πάχους τοιχώματος ( $t$ ) προκύπτουν από τη διατήρηση σταθερού του γινομένου  $D \times t$ . Σημειώνεται ότι ενώ τα εδαφικά χαρακτηριστικά είναι ίδια σε όλες τις περιπτώσεις, τα χαρακτηριστικά των εδαφικών ελατηρίων μεταβάλλονται λόγω μεταβολής της διαμέτρου του αγωγού από την οποία εξαρτώνται.

Η μετακίνηση (γ) του αγωγού κατά την ενεργοποίηση του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης απεικονίζεται στο Σχήμα 4-5. Παρατηρείται ότι το παραμορφωμένο σχήμα των συνεχών αγωγών είναι μια ομαλή καμπύλη τύπου «S», ενώ η παραμόρφωση των αγωγών με 4 εύκαμπτους κόμβους προσομοιάζει μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τμημάτων.

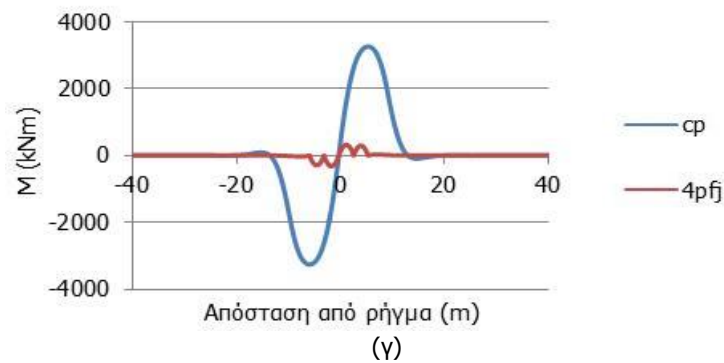


Σχήμα 4-5: Μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για (α)  $D=0.457\text{m}$ ,  $t=25.40\text{mm}$ , (β)  $D=0.610\text{m}$ ,  $t=19.03\text{mm}$  και (γ)  $D=0.914\text{m}$ ,  $t=12.70\text{mm}$

Οι μεγαλύτερες καμπικές ροπές ( $M$ ) αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό που έχει μεγαλύτερη διάμετρο ( $D$ ) και μικρότερο πάχος τοιχώματος ( $t$ ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6(γ). Η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων έχει ως αποτέλεσμα την ίδια σχεδόν ποσοστιαία μείωση των καμπικών ροπών (Πίνακας 4-4) σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.





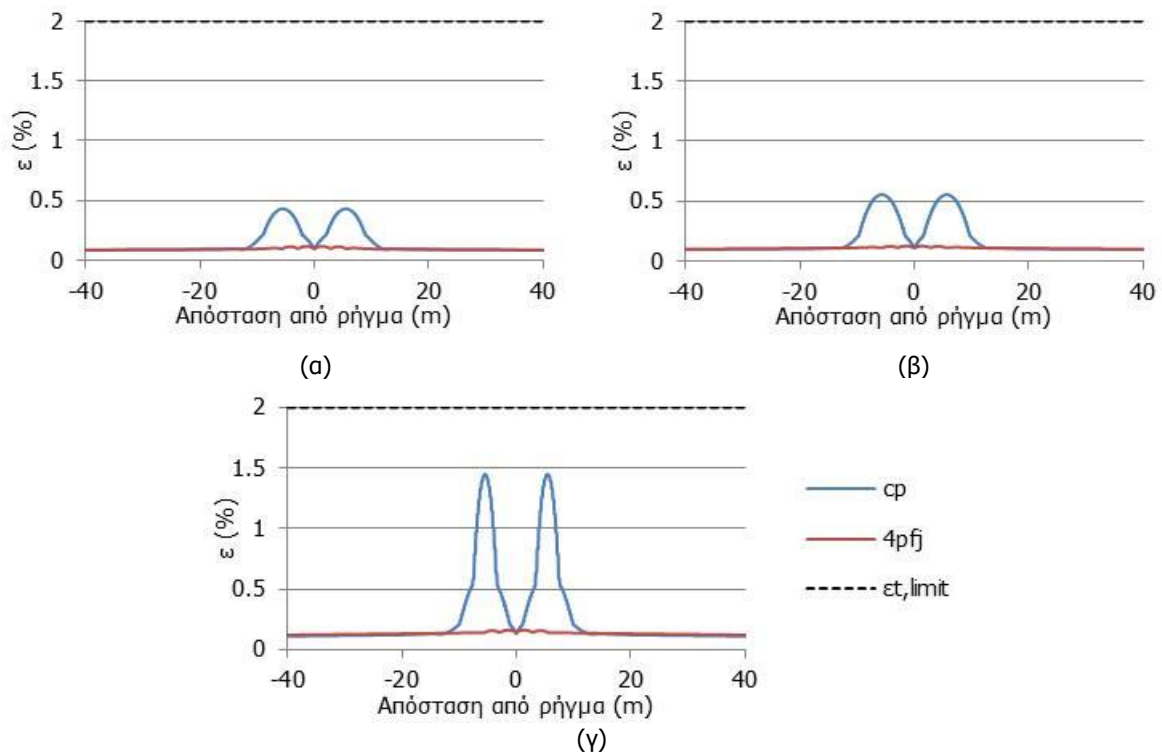


Σχήμα 4-6: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για (α)  $D=0.457\text{m}$ ,  $t=25.40\text{mm}$ , (β)  $D=0.610\text{m}$ ,  $t=19.03\text{mm}$  και (γ)  $D=0.914\text{m}$ ,  $t=12.70\text{mm}$

Πίνακας 4-4: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

Διάμετρος D (m)	Πάχος τοιχώματος t (mm)	Ποσοστό μείωσης (%)
0.457	25.40	89.17
0.610	19.03	90.38
0.914	12.70	90.22

Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις ( $\varepsilon$ ) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-7 όπου διαπιστώνεται ότι δεν υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο ( $\varepsilon_{t,limit}=2\%$ ) σε καμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Η αύξηση της διαμέτρου (D) και η ταυτόχρονη μείωση του πάχους του τοιχώματος (t) του αγωγού οδηγούν σε αύξηση των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών παραμορφώσεων. Ο Πίνακας 4-5 περιλαμβάνει την ποσοστιαία μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω της χρήσης 4 εύκαμπτων κόμβων. Παρατηρείται σημαντική μείωση για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και επομένως η χρήση κόμβων λειτουργεί υπέρ της ασφαλείας του αγωγού έναντι θραύσης των συγκολλήσεών του.

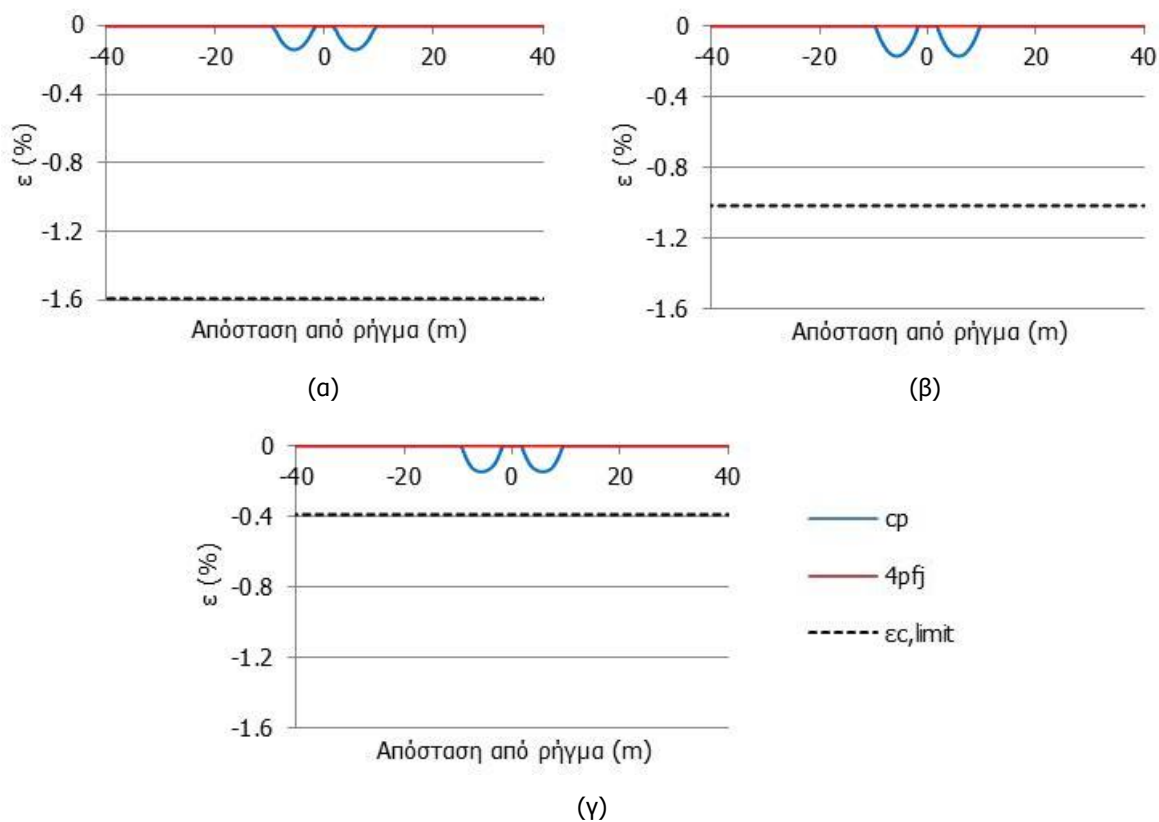


Σχήμα 4-7: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για (α)  $D=0.457\text{m}$ ,  $t=25.40\text{mm}$ , (β)  $D=0.610\text{m}$ ,  $t=19.03\text{mm}$  και (γ)  $D=0.914\text{m}$ ,  $t=12.70\text{mm}$

Πίνακας 4-5: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Διάμετρος D (m)	Πάχος τοιχώματος t (mm)	Ποσοστό μείωσης (%)
0.457	25.40	72.91
0.610	19.03	77.48
0.914	12.70	88.77

Το κανονιστικό όριο έναντι τοπικού λυγισμού  $\varepsilon_{c,limit}$  εξαρτάται από τη διάμετρο (D) και το πάχος (t) του τοιχώματος του αγωγού σύμφωνα με την εξίσωση (1-2) και στις τρεις περιπτώσεις που μελετώνται είναι: (α) -1.60%, (β) -1.02% και (γ) -0.39%. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι όσο μικρότερη είναι η διάμετρος (D) του αγωγού και όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος (t) του τοιχώματός του, τόσο μικρότερος είναι ο κίνδυνος αστοχίας του λόγω τοπικού λυγισμού. Από τον Πίνακα 4-6 και το Σχήμα 4-8 προκύπτει ότι η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων σχεδόν μηδενίζει τις θλιπτικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού, ανεξάρτητα από την τιμή της διαμέτρου και του πάχους τοιχώματος.

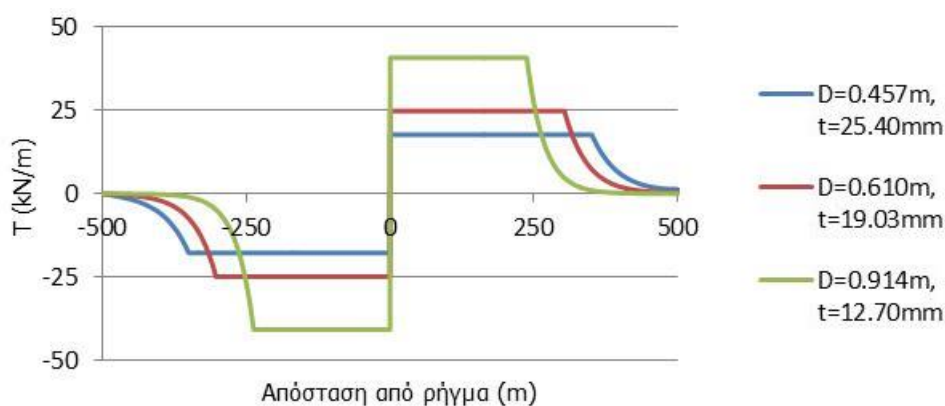


Σχήμα 4-8: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για (α)  $D=0.457\text{m}$ ,  $t=25.40\text{mm}$ , (β)  $D=0.610\text{m}$ ,  $t=19.03\text{mm}$  και (γ)  $D=0.914\text{m}$ ,  $t=12.70\text{mm}$

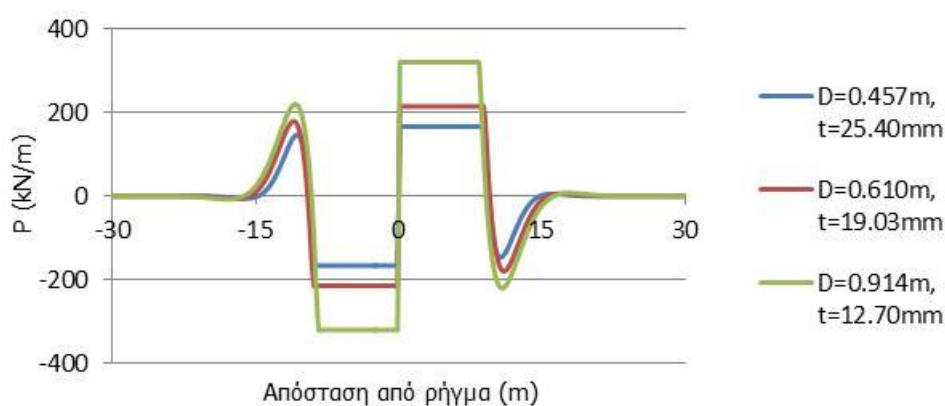
Πίνακας 4-6: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Διάμετρος D (m)	Πάχος τοιχώματος t (mm)	Ποσοστό μείωσης (%)
0.457	25.40	100.00
0.610	19.03	100.00
0.914	12.70	100.00

Η κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής (T) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων (P) απεικονίζεται, αντίστοιχα, στα Σχήματα 4-9 και 4-10. Η αύξηση της διαμέτρου (D) του αγωγού και η μείωση του πάχους τοιχώματος (t) οδηγούν σε αύξηση των ορίων διαρροής των εδαφικών ελατηρίων και σε ελάττωση του εύρους πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιοχή του ρήγματος.



Σχήμα 4-9: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής



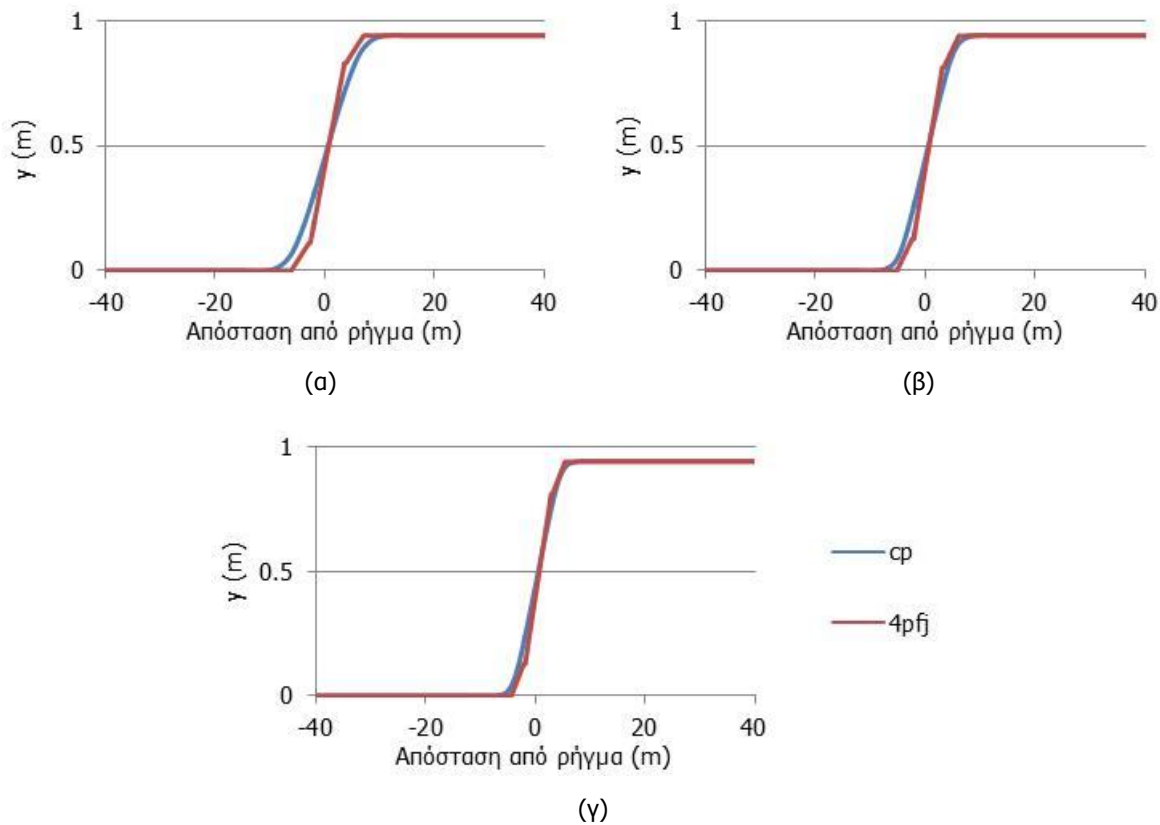
Σχήμα 4-10: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων

### 4.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΑΦΗΣ

Οι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων και φυσικού αερίου βρίσκονται θαμμένοι μέσα στο έδαφος για να προστατεύονται έναντι διάβρωσης και γενικότερης φθοράς, ενώ οι δυνάμεις που ασκεί το έδαφος εξισορροπούν την εσωτερική πίεση του αγωγού. Η απόκριση του εδάφους σε οποιαδήποτε μετακίνηση του αγωγού μέσα στο όρυγμα σχετίζεται άμεσα με το βάθος ταφής του. Επιπλέον, η ποσότητα του υπερκείμενου εδάφους καθορίζει την αναπτυσσόμενη τριβή στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους, η οποία είναι μια σημαντική παράμετρος για τη μηχανική συμπεριφορά του αγωγού όταν υπόκειται σε μεγάλες μετακινήσεις λόγω της ενεργοποίησης ρήγματος. Σύμφωνα με την κατασκευαστική πρακτική, το βάθος ταφής (H) του χαλύβδινου αγωγού στην περιοχή του σεισμικού ρήγματος προτείνεται να είναι περίπου ίσο με μία έως δύο φορές τη διάμετρό του.

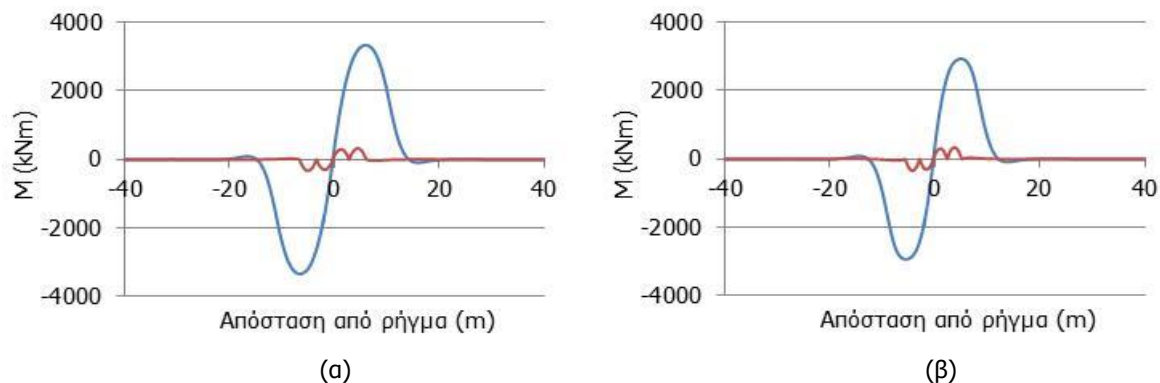
Το βάθος ταφής (H) του χαλύβδινου αγωγού μελετάται στην παρούσα ενότητα σε συνάρτηση με την αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων ως προς την απομείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων. Οι τρεις περιπτώσεις βάθους ταφής που εξετάζονται είναι οι εξής: (α) H=1.00m (β) H=1.50m και (γ) H=2.00m, ενώ ο αγωγός έχει διάμετρο D=0.914m και πάχος τοιχώματος ίσο με t=12.70mm. Αν και τα εδαφικά χαρακτηριστικά διατηρούνται ίδια, οι ιδιότητες των εδαφικών ελατηρίων μεταβάλλονται σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις λόγω μεταβολής του βάθους ταφής. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων οδηγεί ταυτόχρονα και σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση του βάθους ταφής (H) στην απόκριση του συνεχούς αγωγού κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης.

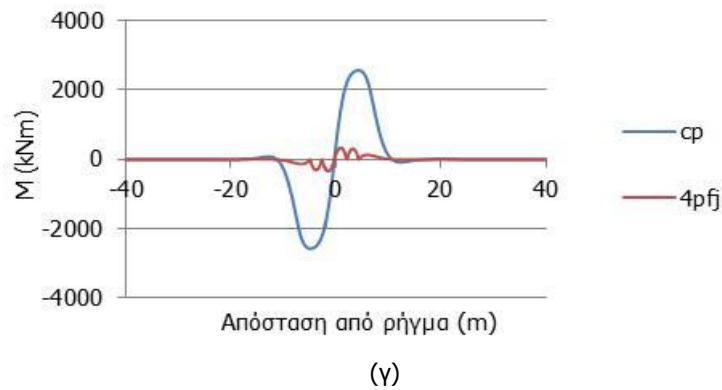
Από το Σχήμα 4-11, στο οποίο παρουσιάζεται η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού, προκύπτει ότι το συνολικό μήκος του αγωγού που καμπυλώνεται μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος ταφής του ( $H$ ), λόγω αύξησης της εδαφικής δυσκαμψίας. Οι συνεχείς αγωγοί παραμορφώνονται με μια ομαλή καμπύλη τύπου «S», ενώ η παραμόρφωση των αγωγών με 4 εύκαμπτους κόμβους χαρακτηρίζεται από μία αλληλουχία ευθύγραμμων τεθλασμένων τμημάτων.



Σχήμα 4-11: Μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος για βάθος ταφής (α)  $H=1.0\text{m}$ , (β)  $H=1.5\text{m}$  και (γ)  $H=2.0\text{m}$

Στο Σχήμα 4-12 παρουσιάζεται η κατανομή των καμπτικών ροπών ( $M$ ) κατά μήκος του αγωγού για διάφορες τιμές του βάθους ταφής ( $H$ ). Παρατηρείται ότι οι καμπτικές ροπές του συνεχούς αγωγού είναι μεγαλύτερες όσο μικρότερο είναι το βάθος που βρίσκεται θαμμένος ο αγωγός. Επιπλέον, σύμφωνα και με τον Πίνακα 4-7, συμπεραίνεται ότι η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων οδηγεί σε σημαντική ποσοστιαία μείωση των καμπτικών ροπών, ανεξάρτητα από την τιμή του βάθους ταφής ( $H$ ) του αγωγού.



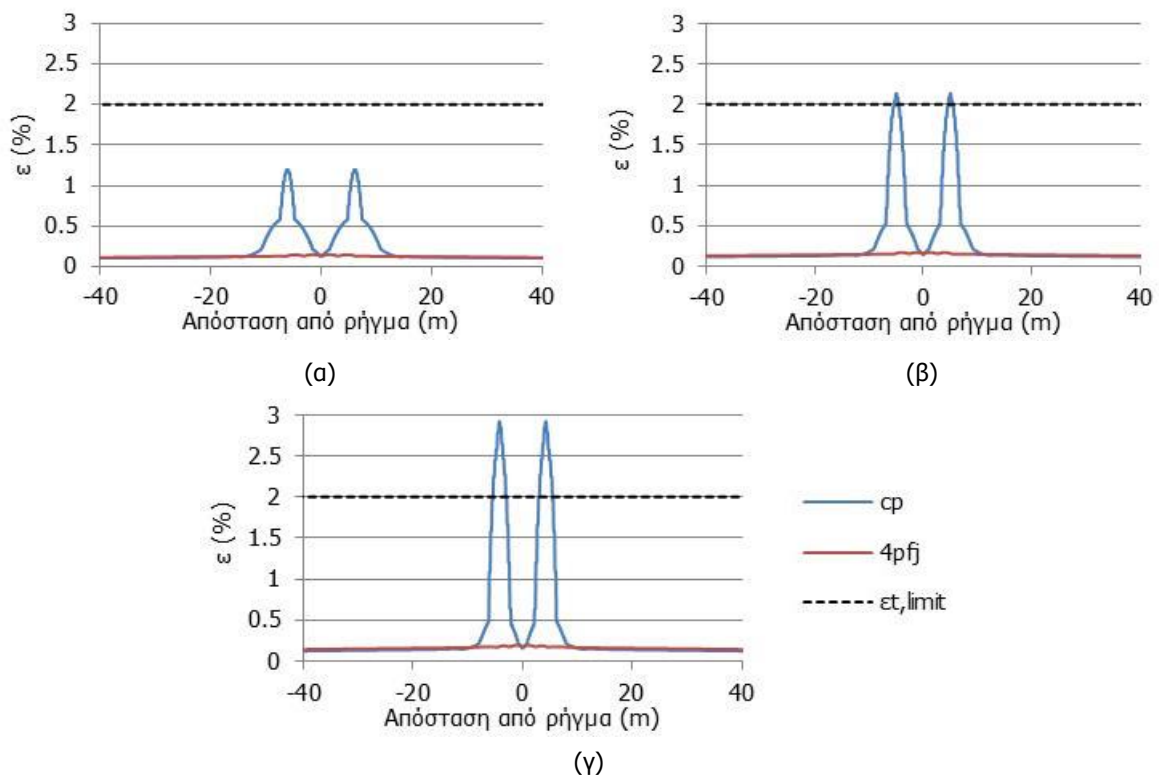


Σχήμα 4-12: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού για βάθος ταφής (α)  $H=1.0\text{m}$ , (β)  $H=1.5\text{m}$  και (γ)  $H=2.0\text{m}$

Πίνακας 4-7: Ποσοστό μείωσης καμπτικών ροπών (%)

Βάθος ταφής $H$ (m)	Ποσοστό μείωσης (%)
1.00	90.27
1.50	88.49
2.00	86.91

Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις ( $\epsilon$ ) κατά μήκος του συνεχούς αγωγού αυξάνονται με την αύξηση του βάθους στο οποίο είναι θαμμένος ο χαλύβδινος αγωγός (Σχήμα 4-13). Μάλιστα στις περιπτώσεις (β)  $H=1.5\text{m}$  και (γ)  $H=2.0\text{m}$  οι εφελκυστικές παραμορφώσεις υπερβαίνουν το αντίστοιχο κανονιστικό όριο έναντι εφελκυστικής αστοχίας ( $\epsilon_{t,limit}=2\%$ ) του αγωγού με κίνδυνο τη θραύση των συγκολλήσεών του. Το βάθος ταφής ( $H$ ) δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απομείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων λόγω της τοποθέτησης 4 εύκαμπτων κόμβων, όπως αποδεικνύεται και από τον Πίνακα 4-8. Η διαφοροποίηση των ποσοστών απομείωσης οφείλεται στη διαφορά των εφελκυστικών παραμορφώσεων κατά μήκος του συνεχούς αγωγού στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

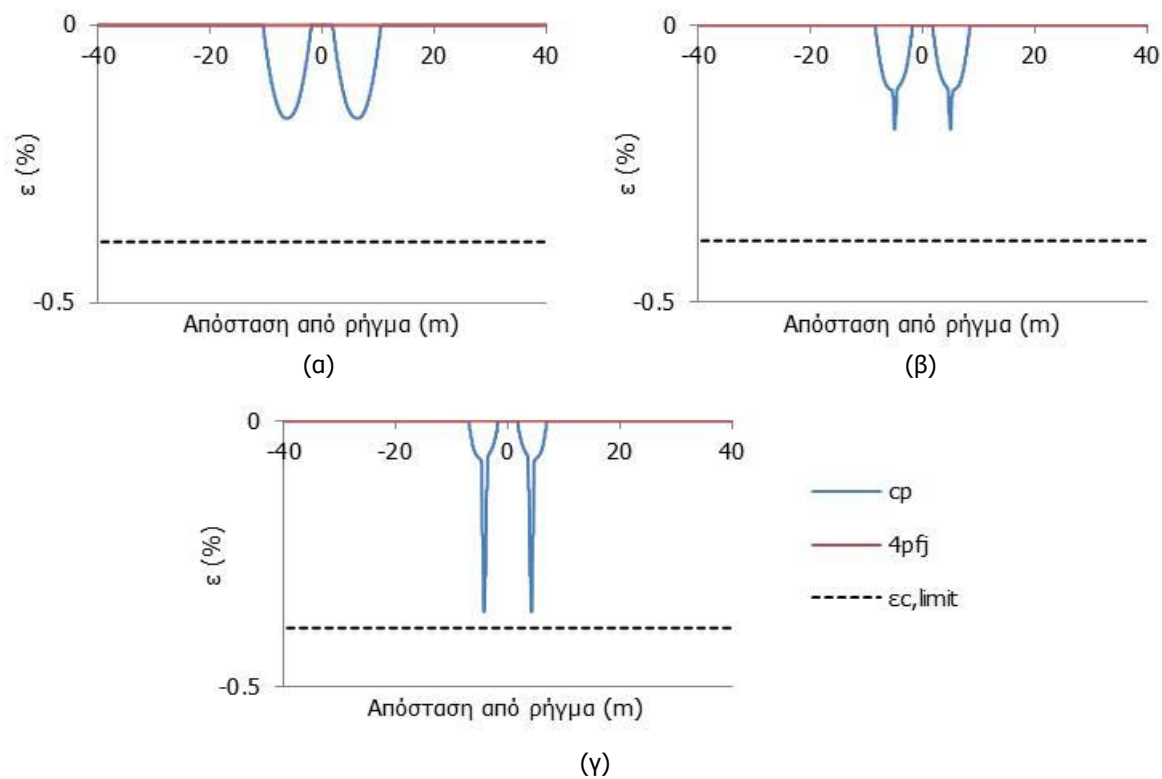


Σχήμα 4-13: Κατανομή εφελκυστικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για βάθος ταφής (α)  $H=1.0\text{m}$ , (β)  $H=1.5\text{m}$  και (γ)  $H=2.0\text{m}$

Πίνακας 4-8: Ποσοστό μείωσης εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

Βάθος ταφής $H$ (m)	Ποσοστό μείωσης (%)
1.00	87.63
1.50	92.00
2.00	93.42

Το κανονιστικό όριο έναντι τοπικού λυγισμού ( $\epsilon_{c,limit}=-0.39\%$ ) δεν υπερβαίνεται για καμία από τις τιμές του βάθους ταφής ( $H$ ) που διερευνώνται. Στο Σχήμα 4-14 παρατηρείται ότι η αύξηση του βάθους στο οποίο βρίσκεται θαμμένος ο συνεχής αγωγός οδηγεί σε αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του. Η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων λειτουργεί ευεργετικά και σχεδόν μηδενίζει τις θλιπτικές παραμορφώσεις (Πίνακας 4-9), ανεξάρτητα από την τιμή του βάθους ταφής ( $H$ ) του αγωγού.



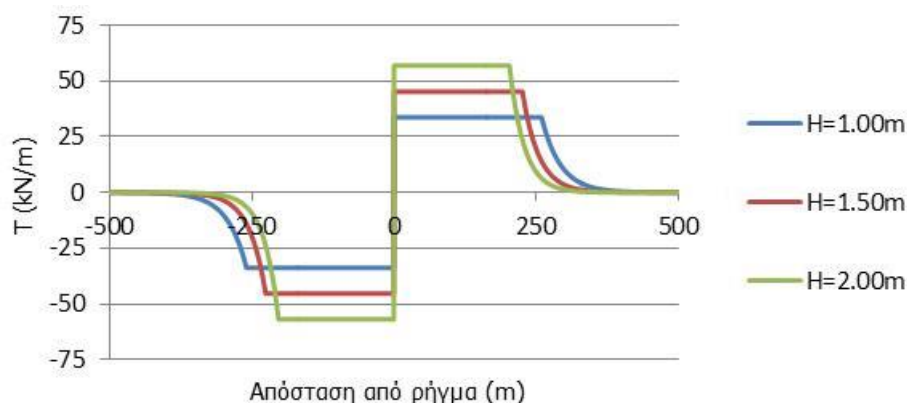
Σχήμα 4-14: Κατανομή θλιπτικών διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού για βάθος ταφής (α)  $H=1.0\text{m}$ , (β)  $H=1.5\text{m}$  και (γ)  $H=2.0\text{m}$

Πίνακας 4-9: Ποσοστό μείωσης θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων (%)

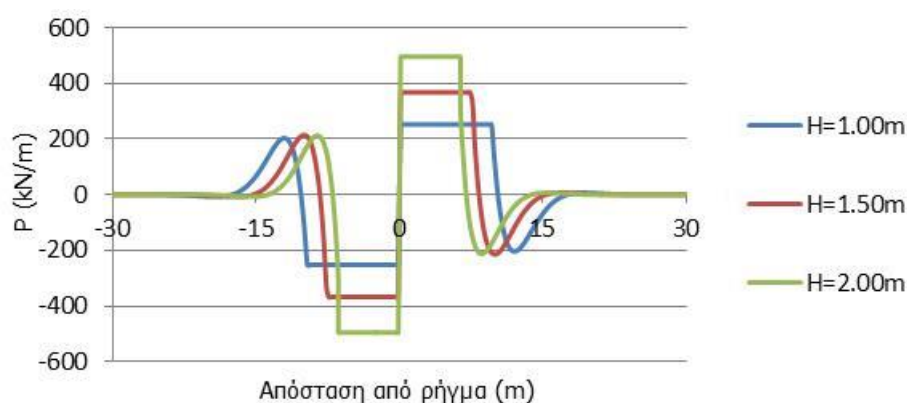
Βάθος ταφής $H$ (m)	Ποσοστό μείωσης (%)
1.00	100.00
1.50	100.00
2.00	100.00

Στα Σχήματα 4-15 και 4-16 παρουσιάζεται η κατανομή των δυνάμεων των αξονικών ελατηρίων τριβής ( $T$ ) και των εγκάρσιων πλευρικών ελατηρίων ( $P$ ) του συνεχούς αγωγού, αντίστοιχα, για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάζονται ως προς το βάθος ταφής ( $H$ ). Παρατηρείται ότι η αύξηση του βάθους ταφής έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ορίου διαρροής των εδαφικών ελατηρίων και την ταυτόχρονη μείωση του μήκους πλαστικοποίησης του εδάφους στην περιοχή του ρήγματος. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού οι εδαφικές δυνάμεις αποτελούν την εδαφική αντίσταση καθώς ο αγωγός

μετακινείται μέσα στο όρυγμα, και η μετακίνηση του αγωγού στο όρυγμα είναι μεγαλύτερη όσο μειώνεται το βάθος ταφής (Σχήμα 4-11).



Σχήμα 4-15: Κατανομή εδαφικών δυνάμεων τριβής



Σχήμα 4-16: Κατανομή πλευρικών εδαφικών δυνάμεων

#### 4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η επιρροή της διαμέτρου ( $D$ ) του χαλύβδινου αγωγού, του πάχους τοιχώματος ( $t$ ) και του βάθους ( $H$ ) που βρίσκεται θαμμένος ο αγωγός στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων, η χρήση των οποίων αποσκοπεί στη μείωση της αναπτυσσόμενης έντασης κατά μήκος του αγωγού και κυρίως στην ελάττωση των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων. Η διερεύνηση αυτή οδηγεί παράλληλα και σε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την απόκριση του συνεχούς αγωγού κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης.

Αρχικά, διατηρώντας σταθερή τη διάμετρο ( $D$ ) του αγωγού και μεταβάλλοντας το πάχος ( $t$ ) του τοιχώματός του, μελετάται η επιρροή του λόγου  $D/t$ . Η αύξηση του πάχους τοιχώματος ( $t$ ) οδηγεί στην αύξηση των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών και στην ταυτόχρονη μείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων. Η χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων, ανεξάρτητα από το λόγο  $D/t$ , έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική απομείωση τόσο των εφελκυστικών όσο και των θλιπτικών παραμορφώσεων των οποίων οι τιμές είναι αρκετά μικρότερες από τα αντίστοιχα κανονιστικά όρια.

Στη συνέχεια, επιχειρώντας να διατηρηθεί σταθερό το γινόμενο  $D \times t$ , αυξάνεται η διάμετρος ( $D$ ) του αγωγού και ταυτόχρονα μειώνεται το πάχος ( $t$ ) του τοιχώματός του και αντιστρόφως. Όπως είναι αναμενόμενο, οι μικρότερες ανηγμένες παραμορφώσεις αναπτύσσονται στο συνεχή αγωγό με τη μικρότερη διάμετρο ( $D$ ) και το μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος ( $t$ ). Αποδεικνύεται, ωστόσο, ότι η χρήση



4 κόμβων έχει ευεργετικά αποτελέσματα ανεξάρτητα από τις τιμές των  $D$  και  $t$  και οδηγεί σε μεγάλη απομείωση των αναπτυσσόμενων κατά μήκος του αγωγού παραμορφώσεων.

Τέλος, η αύξηση του βάθους ( $H$ ) στο οποίο βρίσκεται θαμμένος ο αγωγός συμβάλλει στη μείωση του μήκους του αγωγού που καμπυλώνεται, στη μείωση των καμπτικών ροπών και στην αύξηση τόσο των εφελκυστικών όσο και των θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του. Η τοποθέτηση 4 εύκαμπτων κόμβων με βάση το διάγραμμα καμπτικών ροπών του εκάστοτε συνεχούς αγωγού, ανεξάρτητα από το βάθος ταφής ( $H$ ), έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων, χωρίς να υπάρχει πλέον ο κίνδυνος υπέρβασης των αντίστοιχων κανονιστικών ορίων.

# 5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΡΗΓΜΑΤΟΣ

## 5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων ως προς την απομείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού εξετάζεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα ως προς τη θέση εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης. Οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται βασίζονται στη θεώρηση ενός επίπεδου ρήγματος, μηδενικού πάχους, το οποίο εμφανίζεται στην επιφάνεια του εδάφους ως ευθεία γραμμή και τέμνει τον χαλύβδινο αγωγό στο μέσο του μήκους του που προσομοιώνεται. Αυτές οι παραδοχές, ωστόσο, είναι πιθανό να παραβιαστούν στην πραγματικότητα λόγω των ιδιοτήτων του εδάφους και κυρίως λόγω της στρωματογραφίας του, η οποία ενδέχεται να επηρεάσει τη διάδοση της σεισμικής διάρρηξης από το υποκείμενο βραχώδες υπόβαθρο μέχρι την επιφάνεια του εδάφους.

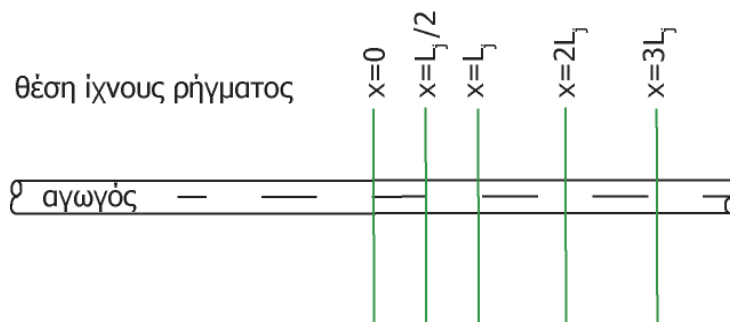
Στην περίπτωση που το μητρικό έδαφος είναι βραχώδες, η διάδοση της σεισμικής διάρρηξης από τα κατώτερα εδαφικά στρώματα έως την επιφάνεια δε διαταράσσεται σημαντικά και η θεώρηση επίπεδου σεισμικού ρήγματος είναι ικανοποιητικά ακριβής. Παρ' όλα αυτά τα ανώτερα εδαφικά στρώματα αποτελούνται συνήθως από εδαφικές αποθέσεις με ανομοιογενή χαρακτηριστικά, οι οποίες ενδέχεται να τροποποιήσουν τον τρόπο με τον οποίο η σεισμική διάρρηξη θα φτάσει στην επιφάνεια. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το ίχνος του ρήγματος να εμφανιστεί σε θέση διαφορετική από την αναμενόμενη, δηλαδή αυτή με βάση την οποία πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η αρχική μελέτη. Για το λόγο αυτό εξετάζεται η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων ως προς τη μείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων σε περιπτώσεις όπου το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται σε διαφορετική θέση από την προβλεπόμενη.

## 5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

### 5.2.1 Κόμβοι σε αποστάσεις $L/2$ και $L$

Η αρχική διερεύνηση πραγματοποιείται για χαλύβδινο αγωγό στον οποίο τοποθετούνται 4 εύκαμπτοι κόμβοι σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος (Σχήμα 2-20), καθώς στα κεφάλαια 2 και 3 αποδεικνύεται ότι ο συγκεκριμένος συνδυασμός κόμβων είναι ο αποδοτικότερος.

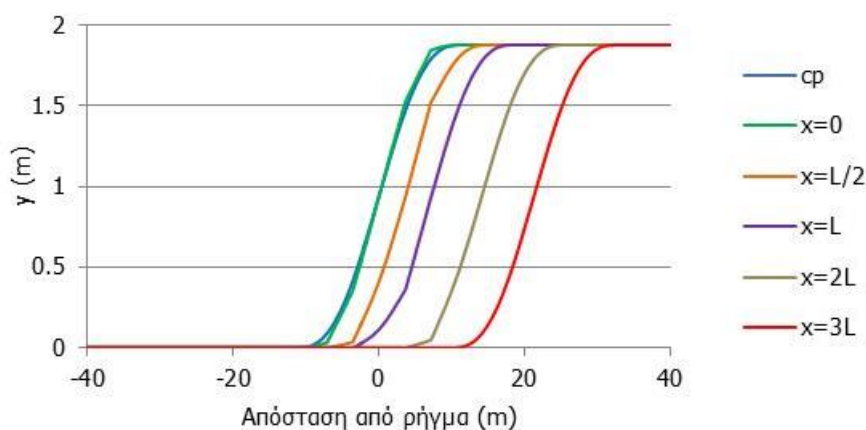
Ακολουθώς, το ίχνος του ρήγματος μετατοπίζεται σε 4 νέες διαφορετικές θέσεις οι οποίες είναι πολλαπλάσια ή υποπολλαπλάσια της απόστασης  $L$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1. Η κατεύθυνση προς την οποία μετατοπίζεται το ίχνος του ρήγματος δεν έχει ποιοτική σημασία καθώς στην παρούσα εργασία εξετάζεται ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης και τα αποτελέσματα είναι συμμετρικά μεταξύ τους ως προς το ίχνος του ρήγματος. Μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού εξετάζεται η αποδοτικότητα των ήδη υπάρχοντων εύκαμπτων κόμβων ως προς την απομείωση των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού και εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα. Η μετακίνηση του ρήγματος στην οποία υποβάλλεται ο αγωγός είναι  $\Delta=2.0\text{m}$ , ενώ οι γωνίες διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος που μελετώνται είναι οι  $\beta=70^\circ$  και  $\beta=90^\circ$ . Η απόσταση  $L$  με βάση την οποία τοποθετούνται οι κόμβοι διαφέρει για τις δύο εξεταζόμενες γωνίες διασταύρωσης καθώς εξαρτάται από την κατανομή των καμπτικών ροπών του αντίστοιχου συνεχούς αγωγού.



Σχήμα 5-1: Θέσεις του ίχνος ρήγματος κατά μήκος του αγωγού

#### 5.2.1.1 Γωνία διασταύρωσης $\beta=70^\circ$

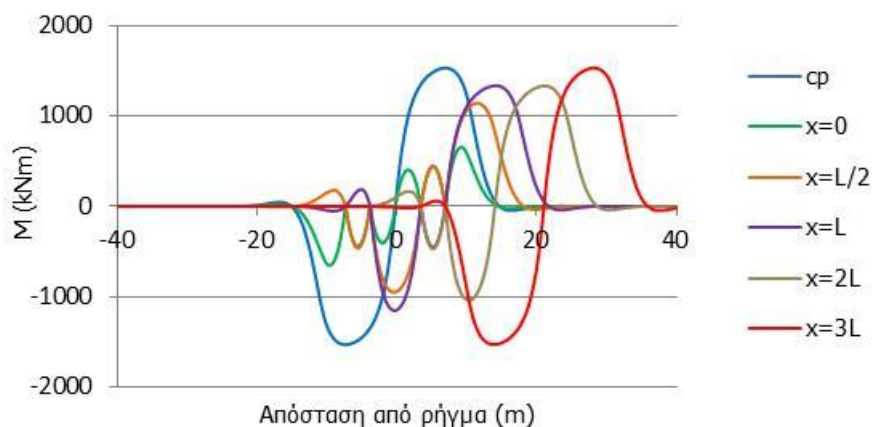
Η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2 για τις διάφορες θέσεις του ίχνος του ρήγματος. Στις περιπτώσεις που το ίχνος του ρήγματος απέχει αρκετά από την αρχική προβλεπόμενη θέση του, η παραμόρφωση του αγωγού μοιάζει με μια ομαλή καμπύλη τύπου «S», δηλαδή προσεγγίζει την παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού.



Σχήμα 5-2: Μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος

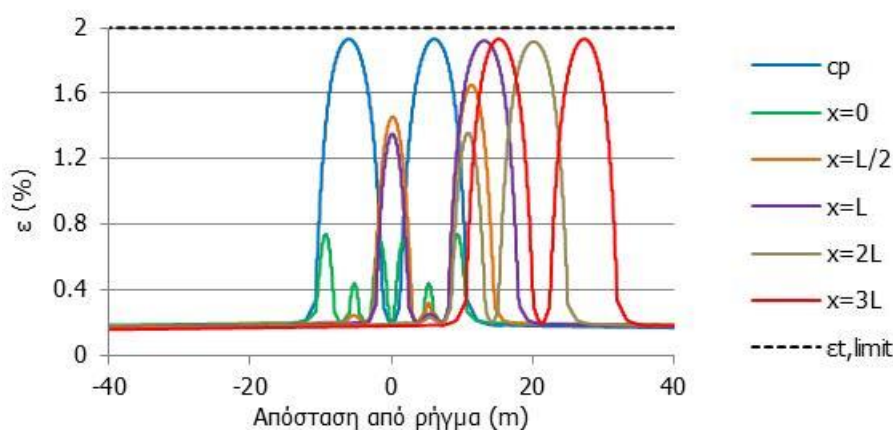
Οι καμπτικές ροπές ( $M$ ) που αναπτύσσονται κατά μήκος του αγωγού δε μειώνονται σε σημαντικό βαθμό στην περίπτωση που το ίχνος του ρήγματος εμφανιστεί σε θέση διαφορετική από την αναμενόμενη (Σχήμα 5-3). Όσο αυξάνεται η απόσταση στην οποία μετατοπίζεται το ίχνος του ρήγματος, η κατανομή των καμπτικών ροπών στους αγωγούς με εύκαμπτους κόμβους μοιάζει με την αντίστοιχη κατανομή του συνεχούς αγωγού. Στην περίπτωση μάλιστα που το ρήγμα είναι στη θέση

$x=3L$ , παρατηρείται ότι η κατανομή του συνεχούς αγωγού έχει απλώς μετατοπιστεί οπότε η εισαγωγή κόμβων δε συμβάλλει στην προστασία του αγωγού.

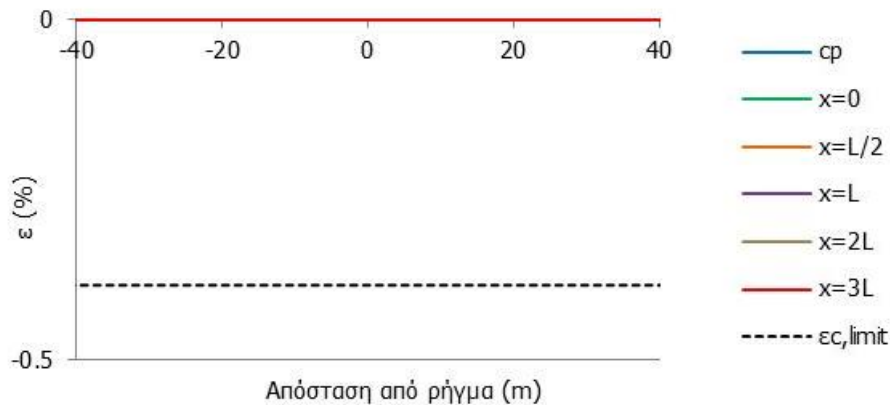


Σχήμα 5-3: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού

Η προσθήκη 4 εύκαμπτων κόμβων είναι ιδιαίτερα αποδοτική ως προς την απομείωση των εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Παρ' όλα αυτά, στην περίπτωση που το ρήγμα εμφανιστεί σε απόσταση μεγαλύτερη του  $L/2$  από την αναμενόμενη θέση του ( $x=0$ ), οι κόμβοι παύουν να λειτουργούν ευεργετικά και οι εφελκυστικές παραμορφώσεις ( $\varepsilon$ ) ισούνται με αυτές του συνεχούς αγωγού όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4, οι οποίες στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο έναντι της θραύσης των συγκολλήσεων του αγωγού ( $\varepsilon_{t,limit}=2\%$ ). Η γωνία διασταύρωσης που εξετάζεται είναι  $\beta=70^\circ$ , οπότε κυριαρχεί η εφελκυστική καταπόνηση του αγωγού, για αυτό και οι θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις παρουσιάζουν σχεδόν μηδενικές τιμές (Σχήμα 5-5). Σημειώνεται, τέλος, πως σε καμία περίπτωση δεν αποδεικνύεται επιβαρυντική η παρουσία των κόμβων, ως προς την αναπτυσσόμενη ένταση του αγωγού.



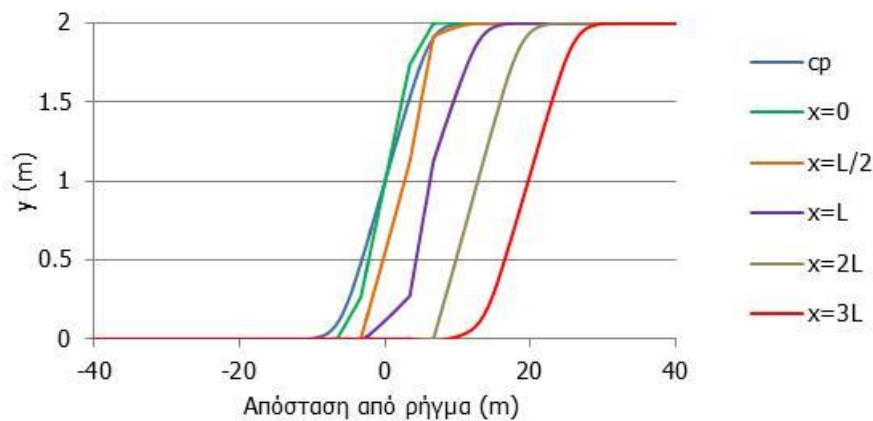
Σχήμα 5-4: Κατανομή εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού



Σχήμα 5-5: Κατανομή θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού

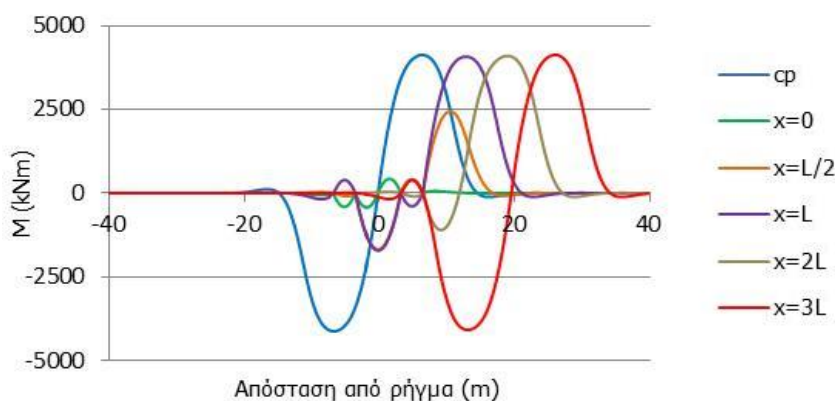
### 5.2.1.2 Γωνία διασταύρωσης $\beta=90^\circ$

Όταν η αβεβαιότητα ως προς την εμφάνιση της σεισμικής διάρρηξης είναι έντονη, οι εύκαμπτοι κόμβοι αποδεικνύεται ότι δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί. Στο Σχήμα 5-6 απεικονίζεται η μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος από όπου προκύπτει ότι η παραμόρφωση των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους μοιάζει όλο και περισσότερο με την παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού όσο αυξάνεται η μετατόπιση του ίχνους του ρήγματος. Στην περίπτωση, ειδικά, που το ρήγμα τοποθετείται στη θέση  $x=3L$  παρατηρείται ότι η μετακίνηση του αγωγού με κόμβους ταυτίζεται με την παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού και είναι μια ομαλή καμπύλη τύπου «S».



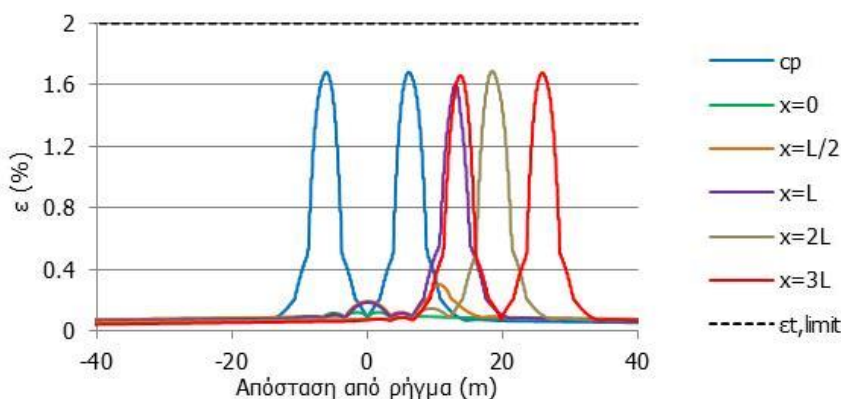
Σχήμα 5-6: Μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος

Οι εύκαμπτοι κόμβοι λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις και οι καμπτικές ροπές ( $M$ ) μηδενίζονται στις θέσεις στις οποίες τοποθετούνται. Αξιοσημείωτη ελάττωση των καμπτικών ροπών παρατηρείται μονάχα όταν το ρήγμα απέχει απόσταση  $x=L/2$  από την «αρχική» του θέση (Σχήμα 5-7). Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις οι μέγιστες καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται κατά μήκος των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους ισούνται με τη μέγιστη καμπτική ροπή κατά μήκος του αντίστοιχου συνεχούς αγωγού.

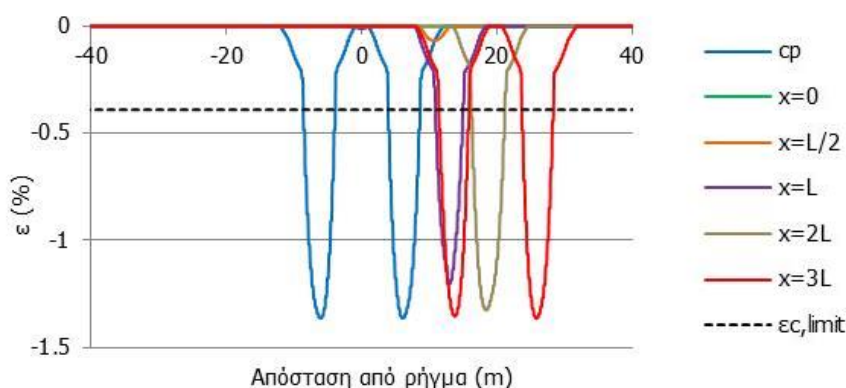


Σχήμα 5-7: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού

Η χρήση εύκαμπτων κόμβων διαπιστώνεται ότι συμβάλλει στην απομείωση των εφελκυστικών και των θλιπτικών παραμορφώσεων ( $\varepsilon$ ) στην περίπτωση που το ίχνος του ρήγματος απέχει απόσταση μικρότερη από  $L$  από τη θέση στην οποία αναμένεται να εμφανιστεί (Σχήματα 5-8 και 5-9). Όταν το ρήγμα βρίσκεται στη θέση  $x=L/2$  η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων είναι μειωμένη σε σύγκριση με αυτή που προβλέπεται κατά τον αρχικό σχεδιασμό, ωστόσο εξακολουθεί να παρατηρείται σημαντική ελάττωση της αναπτυσσόμενης έντασης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η γωνία διασταύρωσης αγωγού ρήγματος είναι  $\beta=90^\circ$  και η επιβαλλόμενη μετακίνηση ισούται με  $\Delta=2.0\text{m}$  ο κίνδυνος εφελκυστικής αστοχίας δεν είναι έντονος, ενώ η εμφάνιση τοπικού λυγισμού είναι αρκετά πιθανή στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάζονται.



Σχήμα 5-8: Κατανομή εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού

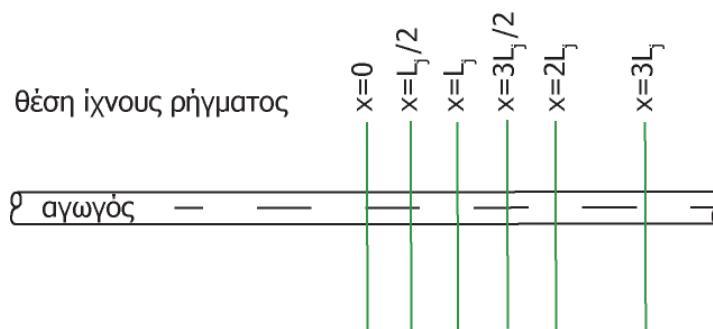


Σχήμα 5-9: Κατανομή θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού

### 5.2.2 Κόμβοι σε αποστάσεις L και 2L

Από την ενότητα 5.2.1 συμπεραίνεται ότι η χρήση εύκαμπτων κόμβων σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος δεν έχει ευεργετικά αποτελέσματα σε περίπτωση που τα διαθέσιμα σεισμολογικά και γεωτεχνικά δεδομένα δεν επιτρέπουν τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του ρήγματος. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι δεν οδηγούν σε απομείωση των αναπτυσσόμενων ανηγμένων παραμορφώσεων όταν το ίχνος του ρήγματος μετατοπιστεί σε απόσταση μεγαλύτερη από  $L$  από την αρχική του θέση, στην οποία και αναμένεται να εμφανιστεί.

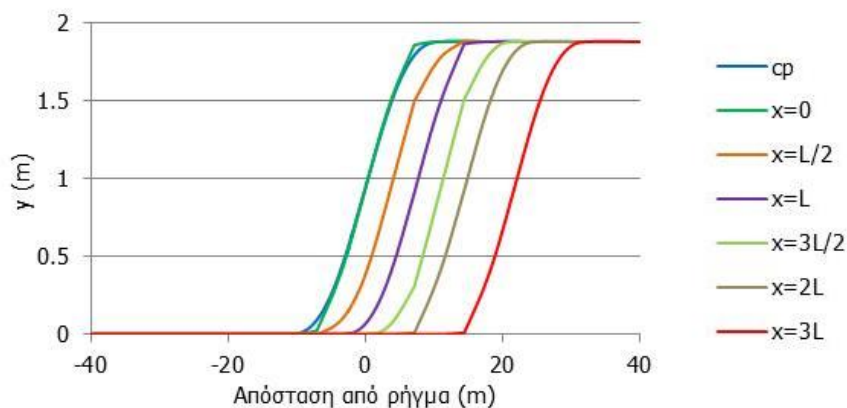
Για το λόγο αυτό, στην παρούσα ενότητα εξετάζονται χαλύβδινοι αγωγοί στους οποίους τοποθετούνται 4 εύκαμπτοι κόμβοι σε αποστάσεις  $L$  και  $2L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος (Σχήμα 2-20). Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να είναι λιγότερα αποδοτικός, όπως αποδεικνύεται στα κεφάλαια 2 και 3, ενδέχεται όμως να λειτουργεί πιο ευεργετικά σε περιπτώσεις που η αβεβαιότητα ως προς τον τρόπο και τη θέση εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης είναι έντονη. Η τοποθέτηση περισσότερων εύκαμπτων κόμβων σε μικρότερες μεταξύ τους αποστάσεις προφανώς και λειτουργεί υπέρ της ασφαλείας, ωστόσο κάτι τέτοιο κρίνεται ως αντιοικονομικό και δε διερευνάται περαιτέρω σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Στις μη-γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται, το ίχνος του ρήγματος τοποθετείται σε 5 νέες θέσεις κατά μήκος του αγωγού οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-10 και είναι πολλαπλάσια ή υποπολλαπλάσια της απόστασης  $L$ .



Σχήμα 5-10: Θέσεις του ίχνους ρήγματος κατά μήκος του αγωγού

#### 5.2.2.1 Γωνία διασταύρωσης $\beta=70^\circ$

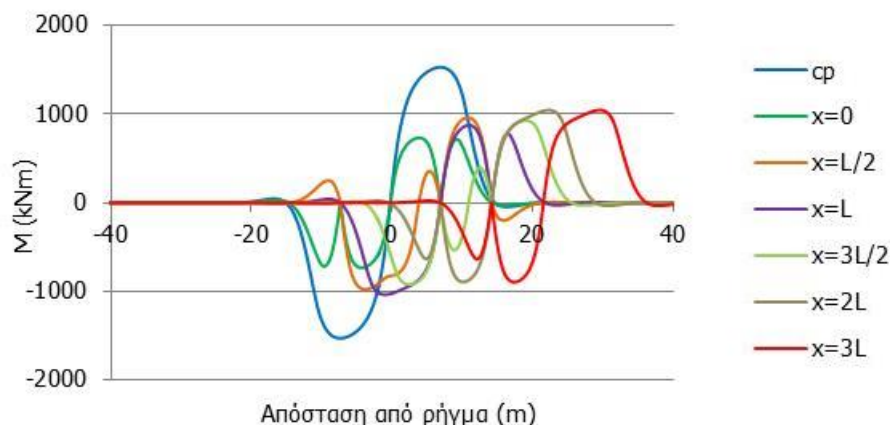
Από τη μετακίνηση ( $y$ ) του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος στο Σχήμα 5-11 προκύπτει ότι η παραμόρφωση του αγωγού αλλάζει απότομα κλίση στις θέσεις που τοποθετούνται οι εύκαμπτοι κόμβοι. Όσο περισσότερο μετατοπίζεται το ίχνος του ρήγματος, η παραμόρφωση των αγωγών με κόμβους μοιάζει περισσότερο με την παραμόρφωση του συνεχούς αγωγού.



Σχήμα 5-11: Μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος

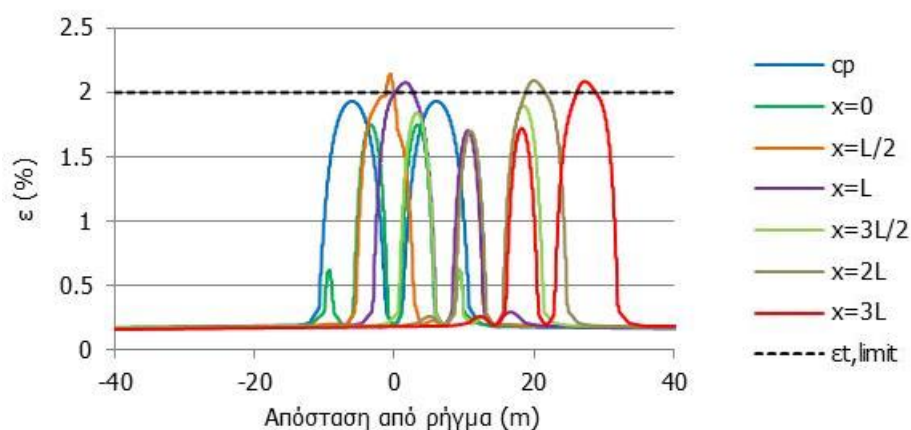


Οι εύκαμπτοι κόμβοι οδηγούν στη μείωση των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών ( $M$ ) για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται ως προς τη θέση του ίχνους του ρήγματος (Σχήμα 5-12). Η μείωση αυτή είναι σημαντικότερη όταν το ρήγμα τοποθετείται στη θέση  $x=L/2$  και ελαττώνεται όσο το ρήγμα απομακρύνεται από την αρχική του θέση.

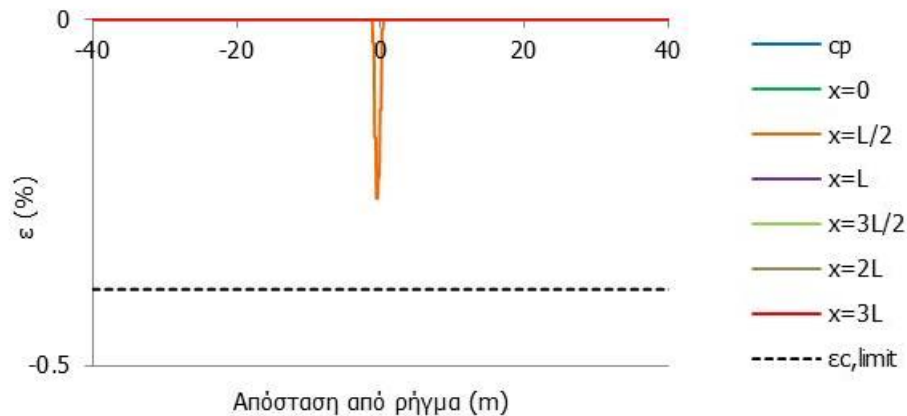


Σχήμα 5-12: Κατανομή καμπτικών ροπών κατά μήκος του αγωγού

Η τοποθέτηση εύκαμπτων κόμβων σε αποστάσεις  $L$  και  $2L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος δε συμβάλλει στη σημαντική απομείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων ( $\varepsilon$ ) όταν η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος είναι  $\beta=70^\circ$  και η μετακίνηση του ρήγματος  $\Delta=2.0\text{m}$ . Αν το ρήγμα εμφανιστεί σε θέση διαφορετική από την αναμενόμενη, τότε οι ανηγμένες παραμορφώσεις δεν υφίστανται καμία ελάττωση σύμφωνα με το Σχήμα 5-13. Σε ορισμένες μάλιστα θέσεις του ίχνους του ρήγματος παρατηρείται ότι οι εφελκυστικές παραμορφώσεις αυξάνονται και οριακά υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο έναντι εφελκυστικής αστοχίας. Επίσης, όταν το ρήγμα μετατοπιστεί κατά απόσταση  $x=L/2$  διαπιστώνεται μια σημειακή αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων (Σχήμα 5-14), οι οποίες σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι σχεδόν μηδενικές.



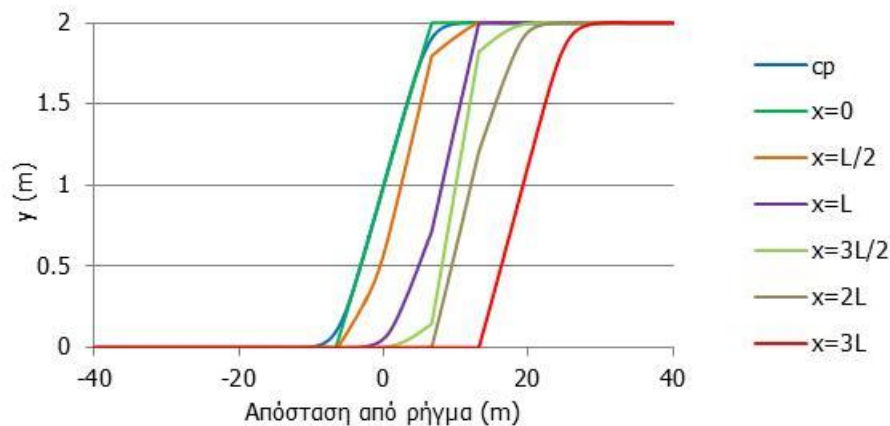
Σχήμα 5-13: Κατανομή εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού



Σχήμα 5-14: Κατανομή θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού

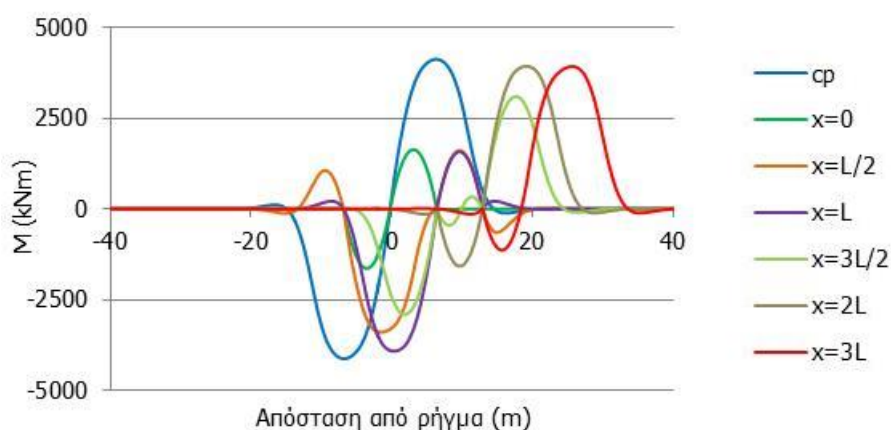
#### 5.2.2.2 Γωνία διασταύρωσης $\beta=90^\circ$

Στο Σχήμα 5-15 παρατηρείται ότι η παραμόρφωση των αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, σε σύγκριση με το συνεχή αγωγό, προσομοιάζει μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τμημάτων λόγω της λειτουργίας του κόμβου ως εσωτερικής άρθρωσης στο στατικό σύστημα. Όσο περισσότερο βέβαια μετατοπίζεται το ίχνος του ρήγματος από την αρχική του θέση, τόσο περισσότερο η παραμόρφωση των αγωγών με κόμβους μοιάζει με την παραμόρφωση του αντίστοιχου συνεχούς αγωγού.



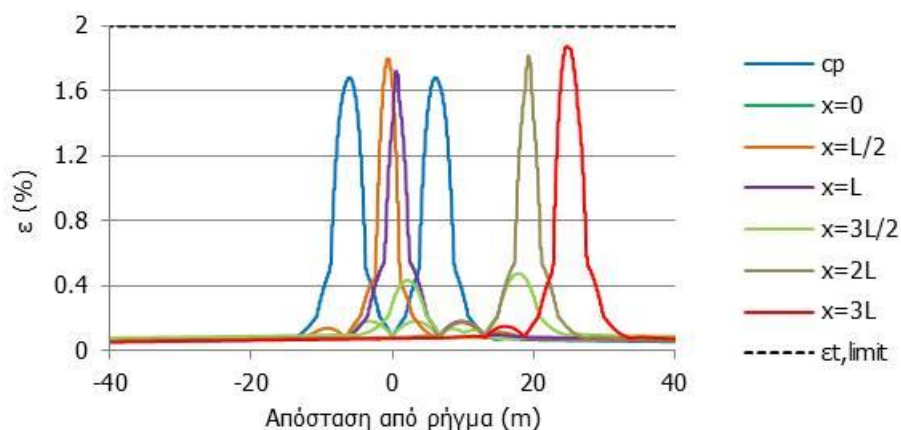
Σχήμα 5-15: Μετακίνηση του αγωγού στην περιοχή του ρήγματος

Η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος ισούται με  $\beta=90^\circ$  και η καμπτική ένταση του αγωγού είναι έντονη, για αυτό και οι τιμές των αναπτυσσόμενων καμπτικών ροπών ( $M$ ) είναι σχετικά υψηλές (Σχήμα 5-16). Η σημαντικότερη απομείωση των καμπτικών ροπών παρατηρείται όταν το ρήγμα τοποθετείται στη θέση  $x=3L/2$ , δηλαδή στο μέσο της απόστασης των δύο εύκαμπτων κόμβων. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις που εξετάζονται οι μέγιστες τιμές των καμπτικών ροπών είναι σχεδόν ίσες με τη μέγιστη ροπή κατά μήκος του συνεχούς αγωγού.

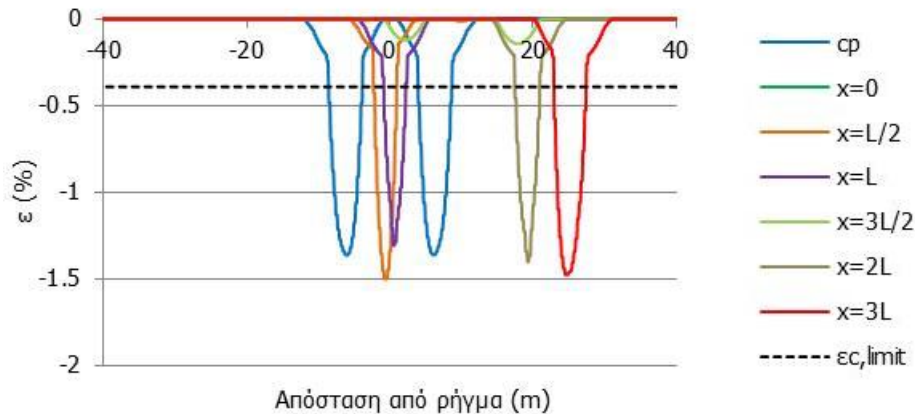


Σχήμα 5-16: Κατανομή καμπτικών ροών κατά μήκος του αγωγού

Οι εφελκυστικές παραμορφώσεις ( $\varepsilon$ ) δεν υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο για τη θραύση των συγκολλήσεων του αγωγού ( $\varepsilon_{t,limit}=2\%$ ), ωστόσο η μετατόπιση του ίχνους του ρήγματος μεταβάλλει την κατανομή τους και σε ορισμένες περιπτώσεις οδηγεί σε μικρή αύξηση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων (Σχήμα 5-17). Σημαντική απομείωση των εφελκυστικών παραμορφώσεων παρατηρείται μόνο στην περίπτωση που το ρήγμα βρίσκεται στη θέση  $x=3L/2$ , δηλαδή ανάμεσα στους δύο εύκαμπτους κόμβους. Αντίστοιχα συμπεράσματα εξαγονται και από το Σχήμα 5-18 που απεικονίζει την κατανομή των θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού. Οι θλιπτικές παραμορφώσεις εμφανίζουν υψηλές τιμές όταν το ρήγμα μετατοπίζεται από την θέση στην οποία αναμένεται να εμφανιστεί με εξαίρεση την περίπτωση  $x=3L/2$ , στην οποία παρατηρείται ο περιορισμός τους κάτω από το κανονιστικό όριο για εμφάνιση τοπικού λυγισμού.



Σχήμα 5-17: Κατανομή εφελκυστικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού



Σχήμα 5-18: Κατανομή θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού

### 5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αξιολογείται η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων όταν το ίχνος του ρήγματος εμφανίζεται σε θέση διαφορετική από την αναμενόμενη. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη επαρκών σεισμολογικών δεδομένων και στην ενδεχόμενη ανεπάρκεια των μεθόδων επεξεργασίας τους, καθιστώντας έτσι δύσκολη την πρόβλεψη του τρόπου διάδοσης της σεισμικής διάρρηξης έως την επιφάνεια του εδάφους. Αρχικά μελετώνται αγωγοί που διαθέτουν 4 εύκαμπτους κόμβους σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος, το οποίο στη συνέχεια μετατοπίζεται σε διάφορες θέσεις προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ζητούμενη διερεύνηση. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι οι εύκαμπτοι κόμβοι δε συνεισφέρουν στην απομείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων όταν το ίχνος του ρήγματος μετατοπίζεται σε απόσταση  $L$  ή μεγαλύτερη από την αναμενόμενη θέση εμφάνισης, χωρίς ωστόσο να δημιουργούν επιπλέον επιβάρυνση στον αγωγό. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μηχανική συμπεριφορά των αγωγών μοιάζει με την απόκριση του συνεχούς αγωγού, με τη διαφορά ότι αλλάζουν οι θέσεις στις οποίες μεγιστοποιούνται οι ανηγμένες παραμορφώσεις. Όταν το ρήγμα τοποθετείται στη θέση  $x=L/2$  η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων είναι μειωμένη αλλά παρατηρείται απομείωση της αναπτυσσόμενης έντασης.

Ακολούθως επιλέγεται να διερευνηθούν αγωγοί με 4 εύκαμπτους κόμβους σε αποστάσεις  $L$  και  $2L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος, παρόλο που ο συνδυασμός αυτός είναι λιγότερο αποδοτικός. Η απόσταση  $L$  μεταξύ των κόμβων αποδεικνύεται αρκετά μεγάλη και η χρήση τους δε συμβάλλει στην απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων όταν υπάρχει έντονη αβεβαιότητα ως προς τη θέση εμφάνισης του σεισμικού ρήγματος. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις παρατηρείται ότι η μετατόπιση του ίχνους του ρήγματος οδηγεί σε μια μικρή αύξηση των εφελκυστικών και των θλιπτικών ανηγμένων παραμορφώσεων. Σε κάθε περίπτωση, κατά το σχεδιασμό ενός υπόγειου μεταλλικού αγωγού προτείνεται να αυξηθεί ο αριθμός και η πυκνότητα των εύκαμπτων κόμβων προκειμένου να ξεπεραστεί το ενδεχόμενο πρόβλημα της αβεβαιότητας και να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος αστοχίας, χρειάζεται όμως να λαμβάνεται υπόψη και η οικονομικότητα της κάθε επιλογής.

## 6 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 6.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην αξιολόγηση ενός νέου τρόπου προστασίας των υπόγειων μεταλλικών αγωγών που διέρχονται από περιοχές που περιλαμβάνουν ενεργά σεισμικά ρήγματα. Κατά μήκος του χαλύβδινου αγωγού τοποθετούνται εύκαμπτοι κόμβοι στην περιοχή του ρήγματος, στόχος των οποίων είναι η απομείωση της αναπτυσσόμενης έντασης και κυρίως των διαμήκων ανηγμένων παραμορφώσεων. Οι εύκαμπτοι κόμβοι που χρησιμοποιούνται είναι μεταλλικοί και λειτουργούν ως εσωτερικές αρθρώσεις καθώς διαθέτουν πολύ μικρή στρωφική δυσκαμψία και μετατρέπουν το συνεχή αγωγό (continuous pipeline) σε σπονδυλωτό (segmented pipeline).

Η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων διερευνάται μέσω παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων στις οποίες λαμβάνεται υπόψη η μη-γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού. Οι αναλύσεις αυτές παρουσιάζονται στο δεύτερο και στο τρίτο κεφάλαιο, στα οποία εξετάζεται ένα εύρος γωνιών διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος ( $\beta$ ). Συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται γωνίες  $\beta \leq 90^\circ$  οπότε ο αγωγός υπόκειται σε καμπτική και εφελκυστική καταπόνηση, ενώ στο τρίτο κεφάλαιο μελετώνται γωνίες  $\beta > 90^\circ$  όπου κυριαρχούν η καμπτική και η θλιπτική καταπόνηση στον αγωγό.

Σε πρώτο στάδιο, τόσο στο δεύτερο όσο και στο τρίτο κεφάλαιο, διερευνάται ο συνεχής αγωγός και η απόκρισή του κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης. Η επιρροή που ασκούν η γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος και το μέγεθος της επιβαλλόμενης μετακίνησης εξετάζονται μέσω πλήθους παραμετρικών αναλύσεων, εκ των οποίων αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα δύο αυτά κεφάλαια. Στη συνέχεια, με βάση το διάγραμμα των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται κατά μήκος του συνεχούς αγωγού και τις θέσεις στις οποίες προκύπτει η μέγιστη τιμή, τοποθετούνται εύκαμπτοι κόμβοι. Η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων αποσκοπεί στη διαφύλαξη της ακεραιότητας του χαλύβδινου αγωγού και στην απομείωση των αναπτυσσόμενων ανηγμένων παραμορφώσεων. Εξετάζονται διάφοροι συνδυασμοί ως προς το πλήθος των εύκαμπτων κόμβων και τις θέσεις στις οποίες τοποθετούνται και συγκρίνονται ως προς την αποτελεσματικότητά τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο διερευνάται η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων συναρτήσει της διαμέτρου, του πάχους τοιχώματος και του βάθους ταφής του μεταλλικού αγωγού. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του αγωγού καθορίζονται κυρίως από τις συνθήκες λειτουργίας του, ωστόσο ο λόγος της διαμέτρου ( $D$ ) προς το πάχος τοιχώματος ( $t$ ) καθορίζει τη λυγρηρότητά του και κατά συνέπεια την τοπική και καθολική ευστάθεια του αγωγού. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται

αναλύσεις σε αγωγό σταθερής διαμέτρου και μεταβαλλόμενου πάχους τοιχώματος. Σε μια προσπάθεια να μελετηθεί περαιτέρω η επιρροή του λόγου  $D/t$  στην απόκριση αγωγών με εύκαμπτους κόμβους, κρίνεται σκόπιμη η διατήρηση σταθερού του γινομένου  $D \times t$  και η πραγματοποίηση αντίστοιχων αναλύσεων. Επιπλέον, η διερεύνηση της επιρροής του βάθους ταφής είναι αναγκαία καθώς η ποσότητα του εδάφους που είναι υπερκείμενη του αγωγού καθορίζει την αναπτυσσόμενη τριβή στη διεπιφάνεια αγωγού – εδάφους. Η απόκριση του εδάφους σε οποιαδήποτε μετακίνηση του αγωγού μέσα στο όρυγμα σχετίζεται άμεσα με το βάθος ταφής του.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της θέσης εμφάνισης του ίχνους του ρήγματος στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Πολλές φορές, είτε λόγω περιορισμένων γεωτεχνικών δεδομένων είτε λόγω της στρωματογραφίας του εδάφους, ο τρόπος με τον οποίο η σεισμική διάρρηξη θα φτάσει στην επιφάνεια του εδάφους είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων ως προς την απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων σε περιπτώσεις όπου το ίχνος του ρήγματος εμφανίζεται σε διαφορετική θέση από την αναμενόμενη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται δύο διαφορετικοί συνδυασμοί ως προς τη χωροθέτηση των εύκαμπτων κόμβων και το ίχνος του ρήγματος μετατοπίζεται σε διάφορες θέσεις προκειμένου να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα των κόμβων.

## 6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι κόμβοι που είναι κατάλληλοι για υπόγειους μεταλλικούς αγωγούς είναι οι μεταλλικοί αρθρωτοί κόμβοι (hinged joints), οι οποίοι έχουν μεγάλη αξονική και πλευρική δυσκαμψία και μπορούν να απορροφήσουν τις μεγάλες μετακινήσεις κατά την ενεργοποίηση ενός σεισμικού ρήγματος. Η αξονική και η πλευρική δυνατότητα μετακίνησης είναι δεσμευμένες και η άρθρωση επιτρέπει μόνο τη στροφική παραμόρφωση του κόμβου. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετώνται είναι αναγκαίο να προσδιορίζεται η στροφική παραμόρφωση των κόμβων ώστε να καθορίζονται οι κατασκευαστικές απαιτήσεις τους.

Η χωροθέτηση των εύκαμπτων κόμβων πραγματοποιείται με βάση την κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του συνεχούς αγωγού. Συγκεκριμένα, οι θέσεις στις οποίες παρουσιάζουν μέγιστο οι καμπτικές ροπές θεωρείται ότι απέχουν απόσταση  $L$  από το ίχνος του ρήγματος και οι κόμβοι τοποθετούνται σε θέσεις που είναι πολλαπλάσια ή υποπολλαπλάσια αυτής της απόστασης  $L$ . Η προσθήκη εύκαμπτων κόμβων έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του συνεχούς αγωγού (continuous pipeline) σε σπονδυλωτό (segmented pipeline), ενώ η παραμόρφωση του αγωγού προσομοιάζει μια αλληλουχία περίπου ευθύγραμμων τμημάτων λόγω της λειτουργίας του κόμβου ως εσωτερικής άρθρωσης στο συνεχές σύστημα. Η παραμετρική διερεύνηση που παρουσιάζεται στα κεφάλαια 2 και 3 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη χωροθέτηση των κόμβων είναι σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος (χρήση 4 εύκαμπτων κόμβων), καθώς συμβάλλει στη μεγαλύτερη απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων.

Η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γωνία διασταύρωσης αγωγού – ρήγματος ( $\beta$ ) και από την τιμή της μετακίνησης του ρήγματος ( $\Delta$ ). Στο κεφάλαιο 2 εξετάζονται γωνίες διασταύρωσης  $\beta \leq 90^\circ$ , οπότε ο αγωγός υπόκειται σε συνδυασμό εφελκυστικής και καμπτικής καταπόνησης. Τα βασικότερα συμπεράσματα του συγκεκριμένου κεφαλαίου συνοψίζονται ως εξής:

- Ανεξάρτητα από τη γωνία διασταύρωσης του αγωγού με το ρήγμα, η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης οδηγεί σε αύξηση των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών κατά μήκος του συνεχούς αγωγού, με μόνη εξαίρεση τις καμπτικές ροπές οι οποίες ελαττώνονται. Οι εφελκυστικές ανηγμένες παραμορφώσεις αυξάνονται και σε πολλές περιπτώσεις υπερβαίνουν το κανονιστικό όριο εφελκυστικής αστοχίας. Οι μέγιστες διαμήκειες τάσεις υπερβαίνουν το όριο διαρροής του χάλυβα,

ωστόσο δεν προκαλείται ιδιαίτερη ανησυχία λόγω της κράτυνσης του υλικού και της μεγάλης του ολκιμότητας.

- Η αύξηση της γωνίας του ρήγματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των αξονικών δυνάμεων καθώς όσο αυξάνεται η γωνία διασταύρωσης τόσο ο αγωγός συμπεριφέρεται ως καμπτόμενη δοκός, με τις καμπτικές ροπές να κυριαρχούν στη συμπεριφορά του. Το κανονιστικό όριο της εφελκυστικής θραύσης των συγκολλήσεων υπερβαίνεται στις περιπτώσεις  $\beta=50^\circ$  και  $\beta=60^\circ$ , ενώ το κανονιστικό όριο των θλιπτικών παραμορφώσεων για εμφάνιση τοπικού λυγισμού υπερβαίνεται για τις γωνίες  $\beta=80^\circ$  και  $\beta=90^\circ$ .
- Η χρήση 4 κόμβων σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος είναι πιο αποδοτική από τη χρήση 2 κόμβων σε απόσταση  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος καθώς οδηγεί σε μεγαλύτερη απομείωση των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων, αρκετά κάτω από τα αντίστοιχα κανονιστικά όρια.
- Η αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων μεγιστοποιείται για γωνίες ρήγματος που πλησιάζουν στην τιμή  $\beta=90^\circ$ , ενώ μειώνεται για μικρότερες γωνίες ρήγματος στις οποίες κυριαρχεί η αξονική ένταση. Αποδεικνύεται ότι η προσθήκη κόμβων σε ένα χαλύβδινο αγωγό δεν είναι αποτελεσματική όταν η γωνία διασταύρωσης είναι μικρότερη από  $\beta=70^\circ$  και ταυτόχρονα η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης είναι μεγαλύτερη από  $\Delta=2.0\text{m}$ .

Στο κεφάλαιο 3 μελετώνται γωνίες διασταύρωσης  $\beta>90^\circ$  όπου ο αγωγός υποβάλλεται σε συνδυασμό θλιπτικής και καμπτικής καταπόνησης. Σύμφωνα με τους κανονισμούς και την κατασκευαστική πρακτική προτείνεται η αποφυγή αυτών των γωνιών, ωστόσο περιορισμοί κατά την όδευση του αγωγού καθιστούν κάτι τέτοιο αναπόφευκτο σε ορισμένες περιπτώσεις.

- Η αύξηση της επιβαλλόμενης μετακίνησης, ανεξάρτητα από την τιμή της γωνία διασταύρωσης, οδηγεί στην αύξηση των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών κατά μήκος του συνεχούς αγωγού, με τις ανηγμένες παραμορφώσεις να υπερβαίνουν σε αρκετές περιπτώσεις τα αντίστοιχα κανονιστικά όρια.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία διασταύρωσης τόσο μεγαλύτερες είναι οι θλιπτικές ανηγμένες παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος εμφάνισης τοπικού λυγισμού.
- Στις περιπτώσεις γωνίας  $\beta=120^\circ$  και μετακίνησης  $\Delta\geq 1.5\text{m}$  σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στο συνεχή αγωγό και παρατηρείται απομείωση των εντατικών μεγεθών και ραγδαία αύξηση των θλιπτικών παραμορφώσεων κατά μήκος του.
- Η χρήση 4 κόμβων σε αποστάσεις  $L/2$  και  $L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος αποδεικνύεται και πάλι αποδοτικότερη σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συνδυασμούς που εξετάζονται. Η προσθήκη των κόμβων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των θλιπτικών αξονικών δυνάμεων και τον περιορισμό των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων εντός των κανονιστικών ορίων. Τέλος, οι μέγιστες στροφές των κόμβων για γωνίες ρήγματος  $\beta>90^\circ$  έχουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές και αυτό θέτει ιδιαίτερες κατασκευαστικές απαιτήσεις για τους κόμβους.

Η απόδοση των εύκαμπτων κόμβων ως προς την απομείωση των εφελκυστικών και θλιπτικών παραμορφώσεων κατά μήκος του αγωγού είναι πρακτικά ανεξάρτητη από το λόγο της διαμέτρου του αγωγού προς το πάχος τοιχώματος και από το βάθος στο οποίο βρίσκεται θαμμένος, επομένως είναι ανεξάρτητη από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και τις εδαφικές ιδιότητες. Οι ανηγμένες παραμορφώσεις μειώνονται όταν αυξάνεται το πάχος τοιχώματος του αγωγού και όταν μειώνεται το βάθος ταφής του. Παρ' όλα αυτά, όπως αποδεικνύεται στο κεφάλαιο 4, η χρήση εύκαμπτων κόμβων έχει ευεργετικά αποτελέσματα σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται.



Η αβεβαιότητα ως προς τον τρόπο και τη θέση εμφάνισης της σεισμικής διάρρηξης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αποδοτικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Οι κόμβοι δε συνεισφέρουν στην απομείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων όταν το ίχνος του ρήγματος βρίσκεται σε απόσταση  $L$  ή μεγαλύτερη από τη θέση στην οποία αναμένεται να εμφανιστεί (κεφάλαιο 5). Η συμπεριφορά του αγωγού σε αυτές τις περιπτώσεις μοιάζει αρκετά με τη συμπεριφορά του συνεχούς αγωγού οπότε η χρήση των κόμβων δε χαρακτηρίζεται από αποδοτικότητα. Ακόμα και στην περίπτωση που οι κόμβοι τοποθετηθούν σε αποστάσεις  $L$  και  $2L$  εκατέρωθεν του ίχνους του ρήγματος προκειμένου να καλυφθεί το εύρος της αβεβαιότητας, η αποτελεσματικότητά τους είναι σημαντικά μειωμένη αν το ρήγμα εμφανιστεί σε θέση διαφορετική από την αναμενόμενη. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος επιτάσσει τη χρήση περισσότερων εύκαμπτων κόμβων σε μικρότερες μεταξύ τους αποστάσεις, αυξάνοντας αρκετά την οικονομική επιβάρυνση αυτού του μέτρου προστασίας των υπόγειων μεταλλικών αγωγών.

### 6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας η προσομοίωση του αγωγού πραγματοποιείται με χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων (beam-type finite elements) και οι τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων υπολογίζονται σε συγκεκριμένες θέσεις της διατομής του υλικού μέσω μη-γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού. Για την πιο λεπτομερή προσομοίωση του φυσικού προβλήματος ο αγωγός μπορεί να προσομοιωθεί με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (shell-type finite elements), ενώ το έδαφος δύναται να προσομοιωθεί με συμπαγή χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (3D solid finite elements) αντί για τα μετακινησιακά μη-γραμμικά ελατήρια στις τρεις διαστάσεις. Η τριβή στη διεπιφάνεια αγωγού – ρήγματος μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο μέσω στοιχείων επαφής (contact elements). Αυτός ο τρόπος προσομοίωσης του προβλήματος προσφέρει την ακριβέστερη προσομοίωση της αλληλεπίδρασης αγωγού – εδάφους και οδηγεί σε ακριβέστερη εκτίμηση μιας ενδεχόμενης αστοχίας από τοπικό λυγισμό.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης περί της αποτελεσματικότητας των εύκαμπτων κόμβων είναι αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς η χρήση τους συμβάλλει στην απομείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων κατά την ενεργοποίηση ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης και στη διατήρησή τους εντός των κανονιστικών ορίων. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται σε πολλές περιπτώσεις η αστοχία του αγωγού είτε από τοπικό λυγισμό είτε λόγω της εφελκυστικής θραύσης των συγκολλήσεών του. Η τοποθέτηση, ωστόσο, εύκαμπτων κόμβων έχει ως συνέπεια τη μείωση της καθολικής δυσκαμψίας της κατασκευής. Ιδιαίτερο, λοιπόν, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η αξιολόγηση του κινδύνου αστοχίας λόγω καθολικού λυγισμού στην περίπτωση που ο αγωγός υποβληθεί σε ενεργοποίηση ανάστροφου ρήγματος.

Τέλος, η αβεβαιότητα ως προς τη θέση εμφάνισης του ρήγματος αποδεικνύεται ένας παράγοντας ο οποίος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κόμβων. Η αντιμετώπιση του προβλήματος της αβεβαιότητας απαιτεί αλλαγές ως προς το πλήθος και την πυκνότητα των κόμβων. Η διενέργεια περισσότερων παραμετρικών αναλύσεων μπορεί να οδηγήσει στον προσδιορισμό της βέλτιστης απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων, έτσι ώστε να οδηγούν σε μείωση των ανηγμένων παραμορφώσεων ανεξάρτητα από τη θέση στην οποία θα εμφανιστεί τελικά το σεισμικό ρήγμα. Σε μια τέτοια μελέτη πρέπει βέβαια να λαμβάνεται υπόψη και η οικονομικότητα της προτεινόμενης λύσης συναρτήσει των συνήθως χρησιμοποιούμενων μέτρων προστασίας.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M.J. O'Rourke and X. Liu, "Response of buried pipelines subjected to earthquake effects, Monograph No. 3", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1999.
- [2] C.J. Gantes and G.D. Bouckovalas, "Seismic verification of high pressure natural gas pipeline Komotini – Alexandroupolis – Kipi in areas of active fault crossings", Structural Engineering International, Vol. 2, pp. 204-208, 2013.
- [3] S.A. Karamanos, B. Keil and R.J. Card, "Seismic design of buried steel water pipelines", Proceedings of the Pipelines 2014: From Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability, Portland, Oregon, USA, pp. 1005-1019, 2015.
- [4] M. Monroy-Concha, "Soil restraints on steel buried pipelines crossing active seismic faults [dissertation]", The University of British Columbia, Canada, 2013.
- [5] H. Bekki, K. Kobayashi, Y. Tanaka and T. Asada, "Dynamic behavior of buried pipe with flexible joints in liquefied ground", Journal of Japan Sewage Association, Vol. 39, pp. 201-208, 2002.
- [6] V.E. Melissianos and C.J. Gantes, "Upheaval Buckling of Onshore Buried Steel Pipelines with Flexible Joints", IASS-SLTE 2014 Symposium, Brasilia, Brazil, 2014.
- [7] V.E. Melissianos, D. Vamvatsikos and C.J. Gantes, "Probabilistic assessment of innovative mitigating measures for buried steel pipeline – fault crossing", Proceeding of the ASME, PVP Conference, Boston, Massachusetts, USA, 2015.
- [8] V.E. Melissianos and C.J. Gantes, "Failure mitigation of buried steel pipeline under strike-slip fault offset using flexible joints", Proceeding of the SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World, Cambridge, UK, 2015.
- [9] Comité Européen de Normalisation, "Eurocode 8, Part 4: Silos, tanks and pipelines", CEN EN 19985-4, Brussels, Belgium, 2006.
- [10] ALA American Lifelines Alliance, "Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe – July 2001 (with addenda through February 2005)", American Society of Civil Engineers, New York, USA, 2005.

- [11] American Society of Civil Engineers, "Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems", Committee on gas and liquid fuel life-lines, technical council on lifeline earthquake engineering, ASCE, New York, USA, 1984.
- [12] T. Ariman and B.J. Lee, "Tension/bending behavior of buried pipelines under large ground deformation in active faults", U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Vol. 4, pp. 226-233, 2001.
- [13] S. Joshi, A. Prashant, A. Deb and S.K. Jain, "Analysis of buried pipelines subjected to reverse fault motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 31, pp. 930-940, 2011.
- [14] E. Uckan, B. Akbas, J. Shen, W. Rou, F. Paolacci and M. O'Rourke, "A simplified analysis model for determining the seismic response of buried steel pipes at strike-slip fault crossings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 75, pp. 55-65, 2015.
- [15] N.K. Kokavasis and G.S. Anagnostidis, "Finite element modeling of buried pipelines subjected to seismic loads: soil structure interaction using contact elements", Proceedings of ASME, PVP Conference, Vancouver, Canada, 2006.
- [16] L. Odina and R. Tan, "Seismic fault displacement of buried steel pipelines using continuum finite element methods", Proceedings of the ASME 2009 28<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.
- [17] P. Vazouras, S.A. Karamanos and P. Dakoulas, "Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30, pp. 1361-1376, 2010.
- [18] P. Vazouras, S.A. Karamanos and P. Dakoulas, "Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike-slip fault movements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 72, pp. 48-65, 2015.
- [19] J. Zhang, Z. Liang and C.J. Han, "Buckling behavior analysis of buried gas pipeline under strike-slip fault displacement", Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 21, pp. 921-928, 2014.
- [20] ADINA R & D Inc. (2006), "Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA", Report ARD 06-7, Watertown, USA, 2006.
- [21] Standards of the Expansion Joint Manufacturers Association – EJMA standard, 2011.
- [22] D.K. Karamitros, G.D. Bouckovalas and G.D. Kouretzis, "Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 27, pp. 200-211, 2007.
- [23] D.K. Karamitros, G.D. Bouckovalas, G.D. Kouretzis and V. Gkesouli, "An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 31, pp. 1452-1464, 2011.
- [24] H.D. Yun and S. Kyriakides, "On the beam and shell modes of buckling of buried steel pipelines", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 9, pp. 179-193, 1990.